



# Estudio de una Galaxia Esferoidal Enana Particular de la Vía Láctea a través de Simulaciones Numéricas de N-Cuerpos.

Diego Fernando Castellanos Torres

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
BOGOTÁ-COLOMBIA  
2017



# Study of a Dwarf Spheroid Galaxy Particular of the Milky Way through of Numerical Simulations of N-Bodies.

Diego Fernando Castellanos Torres

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA SOMETIDO COMO  
REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGISTER EN CIENCIAS-FÍSICA

Director:  
Dr. Rigoberto Casas Miranda

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
BOGOTÁ-COLOMBIA

2017

## Dedicatoria

A Dios por ser siempre ese sentimiento de alegría,  
tranquilidad y serenidad en cada momento de esta  
etapa de vida que esta próxima a culminar, espero  
ser digno por tan valioso esfuerzo.

A mis padres, Nancy Torres, Florencio Castellanos,  
por amarme y considerar la educación como la mejor  
forma de ser una persona completa en intelecto y espíritu.  
El tesoro más valioso son todos y cada uno  
de los valores que me inculcaron.

A mis hermanos Jenny y Fabian,  
gracias por su apoyo y amor incondicional.  
Finalmente a un gran ejemplo, mi amada Mónica  
que con su amor le dió valor a los momentos ricos,  
y en los difíciles no me dejó claudicar.

## Agradecimientos

Al profesor Rigoberto Casas por su paciencia y orientación.  
A los profesores Plamen Neichev y Orlando Organista por la formación inicial en la física.

A mis compañeros del grupo de investigación en Astrofísica UN,  
y al grupo de astronomía AMALTEA UPN  
que me contagiaron la pasión por la Astrofísica y Cosmología.

## Resumen

En diferentes estudios sobre las galaxias enanas esferoidales (dSph) de la Vía Láctea se afirma que estos sistemas podrían estar dominados por materia oscura debido a los altos valores registrados en la razón masa-luminosidad  $M/L$  observacional. Sin embargo, aún no es claro si las razones  $M/L$  de las dSph inferidas de las observaciones son reales o si por el contrario podrían ser producto de suponer erróneamente que las dSph de la Vía Láctea son sistemas en equilibrio virial. En el último caso, las galaxias dSph podrían carecer de materia oscura.

En este trabajo se presenta un estudio de la evolución de diferentes posibles progenitores sin materia oscura de la galaxia enana esferoidal Carina, una de las galaxias satélites de la Vía Láctea, mediante simulaciones numéricas Newtonianas de N-Cuerpos. En el estudio se realizaron varias simulaciones caracterizadas por satélites que inicialmente se modelan como esferas de Plummer con masas entre  $10^6 M_\odot$  y  $10^8 M_\odot$ , radios de Plummer entre 0.2 y 0.8 kpc y con  $10^5$  partículas para el posible progenitor de Carina. Las simulaciones se realizaron con el programa Gadget2. Se analizó la evolución, la posible deformación de los objetos iniciales debido a los pasos perigalácticos alrededor de la Vía Láctea y se compararon las características de los objetos remanentes en las simulaciones con las correspondientes características observadas para la dSph Carina.

En total se realizaron catorce simulaciones Newtonianas de N-cuerpos, para la distancia apocéntrica de 100 kpc, con el fin de buscar los posibles progenitores de la galaxia de estudio (Carina). Cuatro simulaciones correspondieron a una masa inicial de  $1 \times 10^6 M_\odot$  y un rango de radio de Plummer entre 0.2-0.8 kpc; cinco correspondieron a una masa inicial de  $1 \times 10^7 M_\odot$  y cuyo radio de Plummer fue modificado para cada una entre 0.2-0.6 kpc; cinco correspondieron a una masa inicial de  $1 \times 10^8 M_\odot$  y cuyo radio de Plummer fue modificado para cada una entre 0.4-0.8 kpc.

De acuerdo con el análisis de las simulaciones realizadas, no fue posible reproducir completamente las propiedades observacionales de la galaxia enana esferoidal Carina, y por consiguiente no se pudo determinar un posible progenitor carente de materia oscura para la misma; sin embargo, para la masa  $1 \times 10^7 M_\odot$  y los radios de Plummer 0.5 y 0.6 kpc, tres de las cinco variables  $r_{1/2}$ ,  $\sigma_0$  y  $R_{gc}$  estudiadas tomaron valores observacionales de la galaxia Carina (en el intervalo de tiempo IV (6-8 Gyr) y (5.7-6.5 Gyr) respectivamente) y aunque no todas las variables coincidieron con los valores observacionales, se puede afirmar que esta masa puede ser la base para posteriores trabajos.

**Palabras clave:** galaxias enanas: estructura, parámetros fundamentales; dSph Carina, grupo local, materia oscura.

## Abstract

In different studies of dwarf spheroidal galaxies (dSph) of the Milky Way, it is claimed that these systems could be dominated by dark matter due to the high values recorded in the observational mass-luminosity ratio  $M/L$ . However, it is still unclear whether these values inferred from the observations are real or whether on the contrary could be caused by wrongly assuming that the Milky Way dSph are systems in virial equilibrium. In the latter case, the dSph galaxies may lack dark matter.

This paper presents a study of the evolution of different possible progenitors occurs without dark matter in dwarf spheroidal galaxy Carina, one of the satellite galaxies of the Milky Way, using Newtonian N-Body numerical simulations. Several simulations characterized by satellites initially modeled as Plummer spheres with masses between  $10^6 M_\odot$  and  $10^8 M_\odot$ , Plummer's radio between 0.2 and 0.8 kpc and  $10^5$  particles for the possible progenitor of Carina were performed. These were implemented with Gadget2 program. Evolution is analyzed, possible deformation of initial objects because perigalactics steps around the Milky Way and features of the remaining objects in the simulations were compared with the corresponding observed characteristics for dSph Carina. In conclusion, although not a parent for the dwarf galaxy Carina was obtained, it was possible to find kinematic properties, mass:  $10^7 M_\odot$ , Plummerts radio 0.5-0.6 kpc and,  $d_a = 100 kpc$ , which in most simulations, correspond to a possible parent.

**Keywords:** Dwarf galaxies: structure, basic parameters; Carina dSph, local group, dark matter.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Posibles escenarios de formación de las galaxias enanas . . . . .	3
1.2. dSph Clásicas . . . . .	5
1.3. Ultraténues (Ultrafaint) . . . . .	5
<b>2. Galaxias Enanas Satélite de la Vía Láctea</b>	<b>7</b>
2.1. Distribución de las galaxias dSph y UFDGs . . . . .	7
2.2. Selección de la galaxia para la simulación . . . . .	9
2.3. La galaxia esferoidal enana Carina . . . . .	12
<b>3. Modelo y condiciones iniciales de la simulación</b>	<b>14</b>
3.1. Condiciones iniciales . . . . .	14
3.2. Condiciones orbitales . . . . .	14
3.3. Modelo para la Vía Láctea . . . . .	17
3.4. Modelo para el satélite . . . . .	18
3.5. Propiedades físicas a estudiar en la evolución de los satélites sin materia oscura . . . . .	22
3.5.1. Relación masa-luminosidad aparente . . . . .	22
3.5.2. Brillo superficial central . . . . .	22
3.5.3. Dispersión de velocidades central sobre la visual . . . . .	23
<b>4. Simulaciones Numéricas</b>	<b>24</b>
4.1. Gadget-2 un código para realizar simulaciones Newtonianas de N-cuerpos .	24
4.2. Evolución de posibles progenitores de Carina sin materia oscura . . . . .	25
4.2.1. Radio de Plummer diferente . . . . .	25
4.2.2. Masa diferente . . . . .	26
4.3. Comparación con Carina . . . . .	27
4.3.1. Satélites con masa $10^6 M_{\odot}$ . . . . .	28
4.3.2. Satélites con masa $10^7 M_{\odot}$ . . . . .	34
4.3.3. Satélites con masa $10^8 M_{\odot}$ . . . . .	40
4.4. Discusión de resultados . . . . .	45
<b>Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>50</b>

# Índice de figuras

1.	Encuentro entre una galaxia enana y otra con 100 veces su masa, se ilustra la componente estelar de ambas evolucionando en el tiempo de 2 mil millones de años a 7 mil millones de años. En blanco la galaxia enana y en amarillo la Vía Láctea con 10.000 veces su masa.[11] (D-Onghia et al. 2009) . . . . .	4
2.	Distribución de galaxias enanas esferoidales en el grupo local, las clásicas (dSph) y las ultra compactas (UFDG) en color azul y las de reciente descubrimiento en color rojo (Bechtol et al. 2015) [4] . . . . .	8
3.	Distribución de RR-Lyrae y cefeidas que conforman el estudio fotométrico de la enana esferoidal Carina, hecha por aladin applet en Simbad (clickable map). . .	12
4.	Órbita de Carina para 10 Gyr plano YZ y en 3D teniendo en cuenta los parámetros de las tablas 6 y 7. . . . .	16
5.	Forma del satélite, potencial de Plummer. . . . .	18
6.	Radios de Lagrange en función del tiempo para un satélite con masa $10^6 M_\odot$ y $R_p = 0.4$ kpc. . . . .	19
7.	Energías para el satélite, donde se observa la energía cinética (verde), potencial (roja) y mecánica total (azul). La energía virial tiene unidades gadget ( $10^{10} M_\odot km^2/s^2$ )	19
8.	Se muestran los radios de Plummer $R_p = 0.3$ kpc (gráfica superior) y $R_p = 0.6$ kpc (gráfica inferior) con una masa de $10^7 M_\odot$ y una distancia apocéntrica de 100 kpc . . . . .	26
9.	Se muestran satélites con $R_p = 0.3$ kpc y masas $1 \times 10^6 M_\odot$ (Izquierda superior), $1 \times 10^7 M_\odot$ (derecha superior); $1 \times 10^8 M_\odot$ (inferior) con una distancia apocéntrica de 100kpc . . . . .	27
10.	Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^6 M_\odot$ . (a) con un radio de Plummer de 0.2 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con un radio de Plummer de 0.3 kpc (gráficas columna de la derecha). En la parte central de las gráficas tanto (a) y (b) superior se ubica los radios de Lagrange (L.R [kpc]) de colores se pueden apreciar color rojo radio de Lagrange $R1\%$ de su masa, color verde $R10\%$ , color azul $R30\%$ , color fucsia $R50\%$ , en color azul claro $R70\%$ y amarillo $R90\%$ . . . . .	28
11.	Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^6 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.4 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.8 kpc (gráficas columna de la derecha). . . . .	31
12.	Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^7 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.2 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.3 kpc (gráficas columna de la derecha). . . . .	34
13.	Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^7 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.4 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.5 kpc (gráficas columna de la derecha). . . . .	36
14.	Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^7 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.6 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.7 kpc (gráficas columna de la derecha). . . . .	38
15.	Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^8 M_\odot$ .(a) con radio de Plummer de 0.4 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.5 kpc (gráficas columna de la derecha). . . . .	40
16.	Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^8 M_\odot$ .(a) con radio de Plummer de 0.6 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.7 kpc (gráficas columna de la derecha). . . . .	41



17.	Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.8 kpc. . . . .	43
-----	--	----

# Índice de tablas

1.	Censo de las galaxias dSph y Ultraténues (11 clásicas listado de la izquierda y 16 ultraténues listado de la derecha y 8 de reciente descubrimiento en el polo sur galáctico.) Willman et al. 2005 [72], Zucker et al. 2006 [74], Belokurov et al. 2007 [6], Donghia et al. 2008 [13], Walsh et al. 2007 [69], Bechtol et al. 2015 [4].	6
2.	Listado en color gris, satélites ultraténues descubiertos por SDSS. Listado en color blanco galaxias enanas esferoidales clásicas Pre-SDSS. Parámetros generales de las galaxias esferoidales enanas (Tomado E.J.Tollerud et al. 2008)[64]. . . . .	9
3.	Listado de las galaxias enanas esferoidales dShp y <i>Ultrafaint</i> , en gris los posibles candidatos a ser estudiados. dSph clásicas y ultrafaint, características, (tomado de Lokas et al 2009)[32]. . . . .	10
4.	Coordenadas Galácticas y distancias, (Lux et al. 2010)[35]. . . . .	11
5.	Propiedades físicas y cinemáticas de la galaxia enana Carina. $r_{1/2}$ es el radio de brillo medio; $\sigma$ es la dispersión de velocidades central; $L_\nu$ es la luminosidad total; $M/L$ es la relación masa-luminosidad; $\mu$ , es el brillo superficial central; $M_v$ es la magnitud absoluta. Además de estos valores, hay que tener en cuenta que Carina ha estado orbitando a nuestra galaxia al menos durante 7 Gyr aproximadamente (Pasetto et al. 2011) [51],(Casas et al. 2012) [12]. $V_r$ y $V_T$ son las velocidades radial y tangencial con respecto al centro galáctico. Y $R_{gc}$ la distancia galactocéntrica de Carina. [39] McConnachie et al. 2012 y Irwin et al 1995 [20], [51] Pasetto et al. 2011, [54] Revaz et al.2009, [33] Lokas et al. 2010, [68] Walker et al. 2009,[53] Piatek et al. 2003, [32] Lokas et al. 2009, [29] Kroupa et al. 1997. . . . .	13
6.	Elementos Orbitales actuales de Carina (Piatek et al. 2003)[53]. . . . .	14
7.	Posiciones y Velocidades actuales (Piatek et al. 2003)[53]. . . . .	14
8.	Las posiciones (x,y,z) están en coordenadas galactocéntricas. En color gris se destacan los parámetros que se modificaron en cada una de las simulaciones. Los valores de posición y velocidad fueron obtenidos del programa integrador. . . . .	17
9.	Parámetros usados en el progenitor de Carina . . . . .	18
10.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.2kpc$ y una masa de $1 \times 10^6 M_\odot$ . . . . .	29
11.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.3 kpc$ y una masa de $1 \times 10^6 M_\odot$ . . . . .	30
12.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.4 kpc$ y una masa de $1 \times 10^6 M_\odot$ . . . . .	32
13.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.8 kpc$ y una masa de $1 \times 10^6 M_\odot$ . . . . .	32
14.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.4 kpc$ y una masa de $1 \times 10^7 M_\odot$ . . . . .	37
15.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.5 kpc$ y una masa de $1 \times 10^7 M_\odot$ . . . . .	37
16.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.6 kpc$ y una masa de $1 \times 10^7 M_\odot$ . . . . .	39
17.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.7 kpc$ y una masa de $1 \times 10^8 M_\odot$ . . . . .	42
18.	Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.8 kpc$ y una masa de $1 \times 10^8 M_\odot$ . . . . .	44
19.	Resumen de las propiedades cinemáticas que reproducen los valores observacionales de Carina para todos los satélites con diferentes radios de Plummer y masas $10^6$ y $10^7 M_\odot$ , en diferentes intervalos para cada simulación. . . . .	46

20.	Resumen de las propiedades cinemáticas que reproducen los valores observacionales de Carina para todos los satélites con diferentes radios de Plummer y masa $10^8 M_\odot$ , en diferentes intervalos para cada simulación. . . . .	47
-----	--	----

## 1. Introducción

Un debate permanente en la cosmología actual es el problema de la materia oscura. Este tipo de materia que conforma la masa de estructuras en el universo, tales como: galaxias, cúmulos de galaxias, agrupaciones de estrellas y objetos celestes distantes, da cuenta muy bien de la distribución de materia a grandes escalas pero, según las observaciones, todavía existen discrepancias en la conformación de la masa en el Grupo Local, como los cúmulos globulares [18, 27, 44, 45, 61]. A pesar de que no es posible detectar directamente la materia oscura, se conoce de su existencia por el hecho de que interactúa de forma gravitacional con la materia bariónica. En general, la distribución espacial de la materia oscura no presenta una relación lineal con la distribución espacial de la materia luminica [12].

El estudio de la formación y evolución de galaxias permite conocer cómo se distribuye la materia en el universo. A escalas locales es de gran importancia entender la cinemática y la dinámica de sistemas que podrían estar dominados por materia oscura. Estudiando estos sistemas se puede tener una mejor idea de la influencia de la materia oscura en el Grupo Local, aportando información a los modelos jerárquicos de formación de estructuras en el universo. Estos modelos tratan de dar explicación acerca del origen y la influencia de la materia oscura en la conformación de estructuras del universo [70].

Una población importante de galaxias corresponde a las galaxias enanas esferoidales (*dwarf spheroidal galaxies*, dSph), las cuales hacen referencia a las galaxias elípticas enanas de baja luminosidad que orbitan la Vía Láctea y a sistemas similares acompañantes de la galaxia Andrómeda (M31). Los satélites tipo dSph de la Vía Láctea tienen masas estelares similares a las masas de los cúmulos globulares, aunque son espacialmente mucho más extendidos. Estas características hacen de los sistemas dSph las galaxias con las menores densidades luminosas conocidas [12].

En diferentes estudios se han medido las luminosidades de estas galaxias satélites. Los altos valores registrados en la razón  $M/L$  observacional hacen pensar que son objetos dominados por materia oscura. Este hecho tendría incidencia en la cinemática y morfología de estas galaxias en su formación. Algunos autores sugieren que las dSph al interactuar con el potencial gravitacional de la Vía Láctea se deforman y fragmentan [17, 25, 29], explicando la alta razón  $M/L$  observacional sin que estén dominadas por materia oscura.

De acuerdo con esta interpretación, los sistemas dSph podrían estar lejos del equilibrio dinámico y por lo tanto las masas establecidas bajo la hipótesis de equilibrio no estarían estimadas correctamente. Si las dispersiones de velocidad estelares observadas pueden ser atribuidas a la fragmentación del satélite proyectado a lo largo de la línea de visión, la necesidad de invocar el argumento de la presencia de materia oscura para explicar la cinemática de las galaxias dSph se desvanece.

En referencia a los trabajos de [1] y [36] se logró determinar que las dispersiones de velocidades de las galaxias dSph<sup>1</sup> exceden los  $7 \text{ km/s}$ , ocasionando múltiples interpretaciones sobre el origen y naturaleza de este tipo de sistemas. Si los sistemas dSph se

---

<sup>1</sup>galaxias satélites de la Vía Láctea

suponen como objetos virializados, los altos valores en la dispersión de velocidades indicarían la presencia de cantidades considerables de materia oscura.

En estudios recientes, sin embargo, existen controversias en cuanto a la formación de estructuras a pequeñas escalas cosmológicas, en contraste con la formación de estructura a grandes escalas de acuerdo con el modelo CDM (*the cold dark matter cosmological model*) [49, 59], que explican los modelos jerarquizados de la materia. De acuerdo a la disparidad de las observaciones a escalas locales, no está claro el papel de la materia oscura, ya que sólo se ha podido afirmar que la presencia de esta cambia las propiedades de las galaxias enanas [24].

Aunque la materia oscura juega un papel importante en la conformación y dinámica de estas galaxias, existen trabajos como el de [29] y [12] que nos permite trabajar sin ella para estudiar estos satélites. Es importante en este trabajo contar sin la presencia de la materia oscura para esclarecer la cinemática y dinámica de estos satélites del grupo local, ya que nos permite confrontar los resultados observacionales y ofrece un punto de partida para interpretar los fenómenos que ocurren en las galaxias dSph, fundamentalmente en su formación y evolución.

[29] y [12], muestran que las dSph pueden ser estudiadas mediante simulaciones numéricas de N-cuerpos, que estos sistemas se pueden concebir a partir de objetos esféricos autogravitantes virializados libres de materia oscura y reproducen la gran mayoría de sus propiedades y características. En las observaciones estas galaxias presentan altos valores de  $M/L$  que en principio se debe a que estos objetos se deforman y al parecer están lejos del equilibrio. En las simulaciones estas galaxias se pueden ver como remanentes deformados que permanecen en cuasi equilibrio durante intervalos de tiempo mayores a  $1 \text{ Gyr}^2$ . Estos autores encontraron que los satélites en cuasi equilibrio presentan valores altos de  $M/L$ , similares a los valores correspondientes reportados para algunas dSphs y UFDGs<sup>3</sup> de la Vía Láctea y que en su conjunto, las simulaciones muestran similitudes notables con los satélites reales de la Vía Láctea.

El problema de la existencia y cantidad de materia oscura en galaxias enanas continúa en discusión. Por lo tanto se hace necesario continuar con la investigación acerca de la posibilidad de que las galaxias enanas esferoidales de la Vía Láctea puedan ser remanentes deformados de objetos libres de materia oscura.

---

<sup>2</sup>Giga años  $10^9$  años

<sup>3</sup>galaxias satélite recientemente descubiertas (ultraténues).

## 1.1. Posibles escenarios de formación de las galaxias enanas

En este trabajo se presenta un estudio de la evolución de diferentes posibles progenitores sin materia oscura de la galaxia enana esferoidal Carina que orbita la Vía Láctea, mediante simulaciones numéricas Newtonianas de N-Cuerpos y se verifica si es posible reproducir a partir de las galaxias simuladas las características observacionales de Carina.

A partir de estudios numéricos realizados en la última década se pudo determinar la incidencia de agentes externos en los mecanismos de formación de las galaxias satélites. Uno de ellos pudo haber sido la acreción de gas dominante en la interacción de estas galaxias con una galaxia masiva que debió haber ocurrido hace mucho tiempo. Se supone para este escenario el modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM, para definir las propiedades estructurales de las galaxias, así como su dinámica orbital y el efecto de los campos de radiación cósmica. De otro lado, la morfología de estas galaxias se puede deber a la agitación de mareas cósmicas que define sus propiedades estructurales [38].

Estas galaxias esferoidales enanas podrían estar completamente dominadas por materia oscura, se considera que gran parte de su formación se debió al colapso gravitacional que sufrieron en etapas muy tempranas de su formación, pero esto no explica la separación de las estrellas y su gas, por lo cual su origen no es muy claro. Se plantean dos modelos para dar cuenta de las propiedades de las galaxias enanas. El primero afirma que el gas remanente no se acumula por el proceso de fotocalentamiento generado por la nueva reionización cósmica, a pesar que de este proceso no exista evidencia en la historia de formación de estrellas en estas galaxias. Después de esta época de reionización se siguieron formando estrellas y para la mayor parte de estas galaxias conformadas por halos oscuros las masas asignadas son probablemente demasiado grandes ( $10^8 - 10^9 M_{\odot}$ ) para los procesos que ocurrieron y otros conducidos por los vientos de supernovas que eliminaron el gas [14]. El segundo modelo plantea que el calentamiento se originó por fuerzas de marea gravitacionales en colas de estrellas que reformaron la estructura de estos satélites. Estas fuerzas que tomaron el nombre “tidal shocking” (agitación de mareas) ocurren cuando el potencial gravitacional que actúa sobre una pequeña galaxia varía rápidamente y como consecuencia de las órbitas de la galaxia más grande hace que pueda convertir un disco rotatoriamente conformado de estrellas en un esferoide [14].

La Figura 1 muestra la evolución en el tiempo de una interacción entre un par galaxias enanas. Esto podría representar una interacción entre un pequeño grupo de galaxias enanas y la formación de la Vía Láctea con un alto corrimiento al rojo. Después de 2 mil millones de años casi el 80 % de las estrellas son despojados de la enana más pequeña, pero su halo de materia oscura que rodea la galaxia se ve menos afectado por lo que existe un cambio en la relación de la materia luminosa. Si las galaxias tienen casi la misma masa se fusionan rápidamente, encubriendo los efectos de la extracción de resonancia debido a que casi toda la materia luminosa seguirá vinculada al remanente [14].

Otros modelos explican la transformación morfológica que sufren las galaxias enanas a partir de la interacción con el potencial gravitacional de una galaxia masiva y grupos de estas galaxias, donde su evolución provoca las corrientes de marea. Estas interacciones se logran a través de la simulación de N-cuerpos, se consideran varios pasos perigalácticos de las galaxias en órbitas excéntricas que le hacen perder masa afectando su morfología y evolución dinámica. Una de las explicaciones para cambiar la forma de estas galaxias se da por la variación de la inclinación de su estructura, por la transferencia del momento angular al exterior. Se pasa de la transición de disco a barra y luego a esferoide, la barra

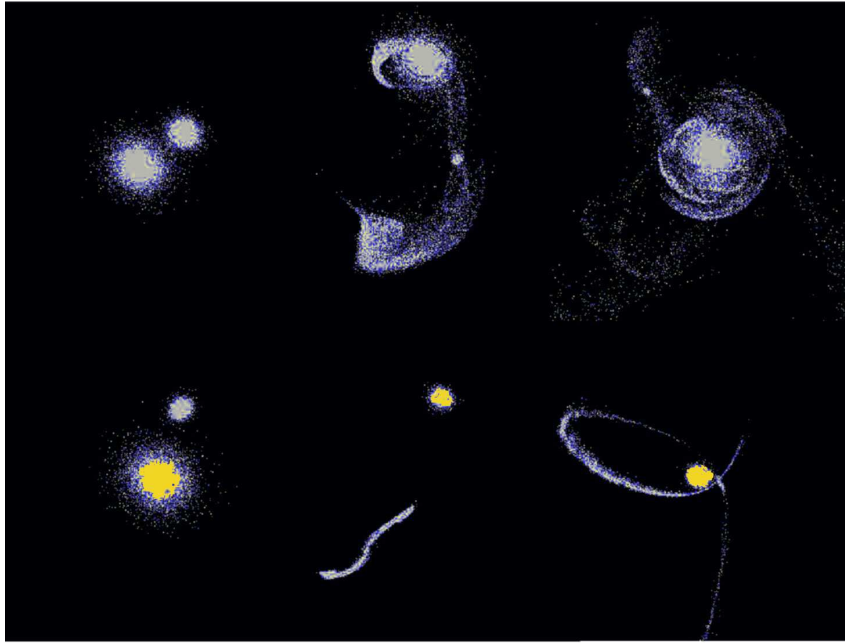


Figura 1: Encuentro entre una galaxia enana y otra con 100 veces su masa, se ilustra la componente estelar de ambas evolucionando en el tiempo de 2 mil millones de años a 7 mil millones de años. En blanco la galaxia enana y en amarillo la Vía Láctea con 10.000 veces su masa.[11] (D-Onghia et al. 2009)

se conserva la mayor parte del tiempo, una galaxia (dSph) se forma a través del acortamiento gradual de la barra. Así, este trabajo proporciona una explicación cuantitativa al mecanismo de transformación morfológica que puede ser decisivo para el origen de las galaxias satélites [26].

Gran parte de los censos llevados a cabo por los telescopios y bases de datos tales como The Sloan Digital Sky Survey (SDSS)[64], buscan contar y catalogar un gran número de satélites de la Vía Láctea [2], que ofrecen indicios de la distribución a escala local de la materia oscura y formación de las galaxias, teniendo en cuenta el umbral de baja luminosidad [64], [11].

Algunas galaxias satélites se han observado en las vecindades del Grupo Local, la gran mayoría de ellas residen en órbitas cercanas al plano perpendicular al disco de la Vía Láctea [41]. Aunque se afirma que estos sistemas podrían estar dominados por materia oscura, su formación es uno de los enigmas pendientes para el entendimiento de estas galaxias [31].

Las dSph son pobres en gas y en estrellas, por lo que usualmente son débiles, mientras que las conocidas como UFDGs (ultra ténues) son inclusive más débiles que cualquier contenido estelar medido de una galaxia. Muchos de los encuentros que sufren estos satélites con la galaxia nodriza dejan remanentes estelares de gas y polvo, que permite notar una forma y simetría diferentes de estas galaxias satélites dependiendo del tipo de encuentro con la galaxia nodriza y sus masas iniciales.

La interacción de galaxias se da de diferentes maneras, una de ellas es la llamada interacción satélite en la cual, una galaxia gigante (por ejemplo la Vía Láctea) interactúa

gravitacionalmente con su galaxia satélite, provocando una pequeña cantidad de formación estelar [71]. Otros mecanismos de encuentros galácticos involucran el concepto de resonancia gravitacional [15], que se mostró en la figura 1.

## 1.2. dSph Clásicas

En el estudio de las galaxias satélites que circundan la Vía Láctea y hacen parte del Grupo Local, no está muy claro su origen y naturaleza [31]; una forma de clasificar estas galaxias es de acuerdo a su morfología. Así, es posible distinguir dos clases: una clase llamada galaxias enanas de tipo irregular (dIrr) y la otra, galaxias esferoidales (dSph). La primera establece la población de galaxias jóvenes que manifiesta una morfología irregular, mientras que las galaxias más antiguas exhiben una morfología esferoidal [28].

Las galaxias dSph son de especial interés en estudios morfológicos, cinemáticos y dinámicos, ya que al vislumbrar sus movimientos propios, perfil de densidad y distribución de masa media relacionada con la luminosidad observada, proveen pistas muy sólidas de forma indirecta de cómo se distribuye la materia oscura a escala local, apoyados en estudios fotométricos de la materia bariónica [11].

Las galaxias clásicas presentan masas que van desde  $10^6 M_\odot$  hasta  $10^8 M_\odot$ , mientras que las ultraténues exhiben masas inferiores. La luminosidad de las galaxias enanas clásicas está entre  $10^5 - 10^7 L_\odot$  en contraste con las ultraténues presentan luminosidades inferiores a las clásicas dSph con  $10^3 - 10^5 L_\odot$ , las cuales son difíciles de percibir con los instrumentos [64].

Las galaxias clásicas dSph guardan una interesante dinámica en cuanto a estructura, masa y luminosidad, por lo cual son un buen escenario de estudio; además ofrecen gran disposición de datos que permiten el estudio de la cinemática y formación de las mismas y, por ende, el entendimiento del Grupo Local de la Vía Láctea.

## 1.3. Ultraténues (Ultrafaint)

Las galaxias Ultraténues (UFDG) tienen características similares a las clásicas dSph, pero se destacan por poseer valores por debajo del rango del cúmulo globular medio  $L_v \simeq 10^3 - 10^4 L_\odot$  y sólo pueden ser resueltas al analizar las leves sobredensidades que presentan las estrellas, por medio de imágenes de profundidad en espectroscopia [57]; también están catalogadas como los sistemas estelares más pobres en metales [19, 60, 62].

Estas bajas luminosidades plantean un desafío importante para la caracterización fotométrica de estos sistemas [10]. De acuerdo con el estudio de algunos parámetros del satélite como la dispersión de velocidades sobre la visual y la razón masa-luminosidad  $M/L_v > 100$  se puede afirmar que su cinemática podría estar influenciada por la materia oscura [46, 60].

La tabla 1 muestra un censo de treinta y cinco (35) galaxias satélites, de las cuales once (11) corresponden a galaxias clásicas y dieciséis (16) corresponden a galaxias ultraténues, de las cuales ocho (8) se descubrieron recientemente. Estas últimas que pertenecen al grupo local fueron descubiertas en el polo sur galáctico con la técnica The Dark Energy Survey (DES) en procesamiento de imágenes de 5000 grados cuadrados en



cinco bandas fotométricas [63]. El desarrollo de técnicas avanzadas en espectroscopía y fotometría (DES) para generar estudios más detallados y en mayor número; posibilitó de buena manera el estudio que se llevó a cabo, ya que proporcionó un amplio espectro de datos sobre las galaxias satélites; en especial, de las galaxias dSph Clásicas.

Nombre	Año descubrimiento	Nombre	Año
<b>Clásicas</b>		<b>Ultraténues</b>	
LMC	1519	Ursa Major I	2005
SMC	1519	Willman I	2005
Sculptor	1937	Ursa Major II	2006
Fornax	1938	Bootes I	2006
Leo II	1950	Canes Venatici I	2006
Leo I	1950	Canes Venatici II	2006
Ursa Minor	1954	Coma Beranices	2006
Draco	1954	Segue I	2006
Carina	1977	Leo IV	2006
Sextans	1990	Hercules	2006
Sagittarius	1994	Leo T	2007
		Bootes II	2007
		Leo V	2008
		Segue II	2009
		Bootes III	2009
		Pisces II	2010
		DES-J0335.6-5403 (Reticulum II)	2015
		DES-J0344.3-4331 (Eridanus II)	2015
		DES-J2251.2-5836 (Tucana II)	2015
		DES-J0255.4-5406 (Horologium I)	2015
		DES-J2108.8-5109 (Indus I)	2015
		DES-J0443.8-5017 (Pictor I)	2015
		DES-J2339.9-5424 (Phoenix II)	2015
		DES-J0222.7-5217 (Eridanus III)	2015

Tabla 1: Censo de las galaxias dSph y Ultraténues (11 clásicas listado de la izquierda y 16 ultraténues listado de la derecha y 8 de reciente descubrimiento en el polo sur galáctico.) Willman et al. 2005 [72], Zucker et al. 2006 [74], Belokurov et al. 2007 [6], Donghia et al. 2008 [13], Walsh et al. 2007 [69], Bechtol et al. 2015 [4].

Debido a que hasta el momento se conocen treinta y cinco (35) galaxias satélites enanas de la Vía Láctea (VL) [4, 11] es de vital importancia reconocer que las galaxias enanas esferoidales presentan las siguientes ventajas.

En primer lugar, ofrecen pistas sobre la formación de las galaxias, al estudiar las altas proporciones en la relación  $M/L$  [29] se puede averiguar indirectamente el contenido de materia oscura de estas. Así mismo, la baja relación Hierro-Hidrógeno  $[Fe/H]$  [62] sería un indicio de la metalicidad característica de dichas galaxias. De otro lado, en cosmología podrían aportar pruebas sobre los satélites perdidos, ( $\Lambda$ CDM)[73]. Finalmente, realizan un aporte a la física de partículas, mediante la detección indirecta de la materia oscura [12].

## 2. Galaxias Enanas Satélite de la Vía Láctea

### 2.1. Distribución de las galaxias dSph y UFDGs

Las observaciones sugieren la existencia de una gran cantidad de materia oscura en el Universo, que es el componente dominante en la masa de las galaxias y cúmulos galácticos. Sin embargo, no hay evidencia observacional para la materia oscura en escalas más pequeñas que los cúmulos globulares [12]. Existen en estas pequeñas escalas una gran cantidad de galaxias dSph que orbitan la Vía Láctea, a distancias que van desde decenas hasta cientos de kpc, con una distribución espacial no isotrópica, siendo muchas de ellas cercanas al plano perpendicular del plano galáctico [50] y [41].

Hasta el año 1998 se lograron observar catorce (14) galaxias incluyendo la nube de Magallanes y seis con baja luminosidad difíciles de detectar [37]. La gran mayoría de estas galaxias satélite se agrupan en los polos perpendiculares al disco de la Vía Láctea, algunas siguen orbitas más excéntricas. Se han identificado grupos de ellas en cúmulos, como por ejemplo, las galaxias enanas de Sculptor, Draco, Sextans, Carina, Fornax, Leo I y Leo II entre otras, que se caracterizan por su baja luminosidad y formas esferoidales [62], consideradas como galaxias clásicas dSph. Pero no son las únicas en este vecindario, existen también otra clase de galaxias esferoidales enanas, las UFDG en la figura 2 se muestran galaxias satélite en una región exterior del centro galáctico, tan alejadas algunas que hacen parte del halo que conforma nuestra galaxia e inclusive se han observado al interior de cúmulos globulares. La diferencia con las galaxias satélites clásicas es que su luminosidad es aún más baja, lo cual hace difícil distinguirlas entre agrupaciones de estrellas y detectarlas por fotometría [10].

Recientemente descubiertas, la galaxia de Bootes III (2009) se localiza a 46 Kpc del Sol y la galaxia Piscis II (2010) [23] ubicada en la constelación de Piscis a una distancia de 180 Kpc datos según Sloan Digital Sky Survey. Las ocho (8) nuevas galaxias que aparecen en la figura 2 en color rojo se cree que son candidatas a galaxias enanas, pero falta confirmación de algunos estudios, aunque están resueltas en sus poblaciones estelares [4].

Algunas de las galaxias esferoidales enanas que habitan en cúmulos son complejas en sus poblaciones estelares, algunas dSphs muestran formas alargadas y distorsionadas (perfil de densidad) [37, 66] mientras que otras dSph muestran forma esférica menos concentrada, con población estelar más sencilla.

A partir del estudio de las galaxias satélites más luminosas de la Vía Láctea se determinó que tienen una distribución espacial anisotrópica, pero no todas las galaxias satélites se distribuyen de la misma forma, explorando nuevas coordenadas se encontró que muchas de estas galaxias se alinean en un plano virtual cerrado o disco de satélites (DoS)[30], este disco muy inclinado y perpendicular con el disco de la Vía Láctea no solo concuerda bien con los datos cinemáticos de la velocidad radial y movimiento propio que sustenten la distribución tridimensional, sino también sirve de soporte de la estructura ante la rotación de la galaxia [40, 42].

Uno de los modelos para establecer el origen de estas galaxias satélites de la Vía Láctea se basa en la Simulación del Milenio, que con éxito reproduce las propiedades de las gala-

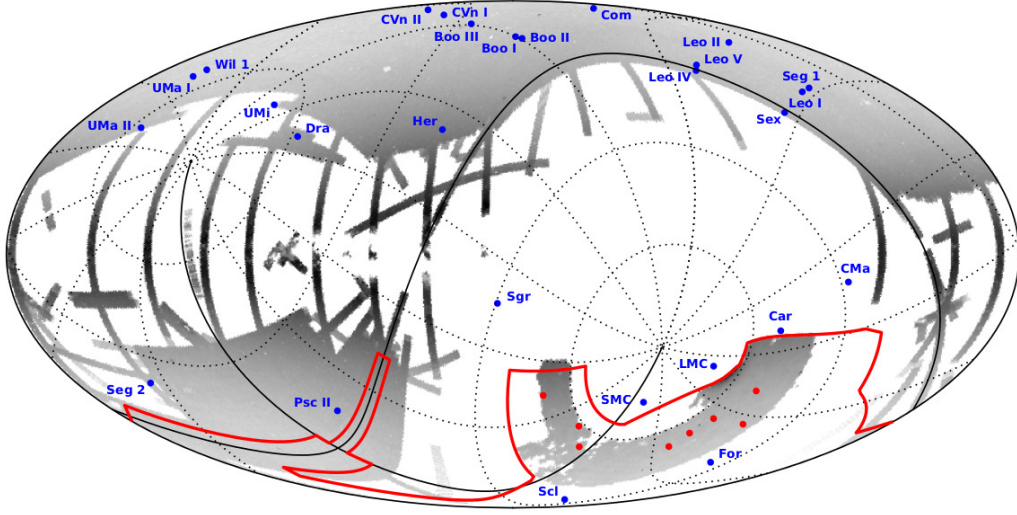


Figura 2: Distribución de galaxias enanas esféricas en el grupo local, las clásicas (dSph) y las ultra compactas (UFDG) en color azul y las de reciente descubrimiento en color rojo (Bechtol et al. 2015) [4]

xias a gran escala, tales como, metalicidad media, edades, radios de media luminosidad, y relaciones masa-luminosidad, que se ajustan muy bien de acuerdo con las últimas mediciones observacionales [31, 34]. Pero no es el único modelo que da cuenta de las variables cinemáticas y dinámicas de este tipo de galaxias. Tanto en la tabla 2 como en la tabla 3 se agrupan los hallazgos de varios autores [64], a partir de las investigaciones hechas acerca de las galaxias clásicas dSph y UFDG que sirven para diversos estudios cinemáticos.

A continuación en la tabla 2, se muestran algunas características relevantes en el estudio de las galaxias satélites, tales como: la distancia al Sol ( $D_{\odot}$ ), el radio de brillo medio ( $r_{1/2}$ ), la magnitud de la galaxia ( $M_{\nu}$ ), la luminosidad ( $L_{\nu\odot}$ ) y la excentricidad en su órbita ( $\epsilon$ )

<b>Galaxia</b>	$D_{\odot}(Kpc)$	$r_{1/2}(pc)$	$M_{\nu}$	$L_{\nu}\odot$	<b>exc <math>\epsilon</math></b>
Bootes I	60	242	-6.3	$2.83 \times 10^4$	1.0
Bootes II	43	72	-2.7	$1.03 \times 10^3$	0.2
Canes Venatici I	224	565	-8.6	$2.36 \times 10^5$	0.99
Canes Venatici II	151	74	-4.9	$7.80 \times 10^3$	0.47
Coma	44	77	-4.1	$3.73 \times 10^3$	0.97
Hercules	138	330	-6.6	$3.73 \times 10^4$	0.72
Leo IV	158	116	-5.0	$8.55 \times 10^3$	0.79
Leo T	417	170	-8.0	$5.92 \times 10^4$	0.76
Segue 1	23	29	-1.5	$3.40 \times 10^2$	1.0
Ursa Major I	106	318	-5.5	$1.36 \times 10^4$	0.56
Ursa Major II	32	140	-4.2	$4.09 \times 10^3$	0.78
Willman 1	38	25	-2.7	$1.03 \times 10^3$	0.99
Carina	94	210	-9.4	$4.92 \times 10^5$	–
Draco	79	180	-9.4	$4.92 \times 10^5$	1.0
Fornax	138	460	-13.1	$1.49 \times 10^7$	–
LMC	49	2591	-18.5	$2.15 \times 10^9$	–
Leo I	270	215	-11.9	$4.92 \times 10^6$	1.0
Leo II	205	160	-10.1	$9.38 \times 10^5$	1.0
Ursa Minor	69	200	-8.9	$1.49 \times 10^5$	–
SMC	63	1088	-17.1	$5.92 \times 10^8$	–
Sculptor	88	110	-9.8	$7.11 \times 10^5$	–
Sextans	86	335	-9.5	$5.40 \times 10^5$	–
Sagittarius	28	125	-15	$8.55 \times 10^7$	–

Tabla 2: Listado en color gris, satélites ultraténues descubiertos por SDSS. Listado en color blanco galaxias enanas esferoidales clásicas Pre-SDSS. Parámetros generales de las galaxias esferoidales enanas (Tomado E.J.Tollerud et al. 2008)[64].

## 2.2. Selección de la galaxia para la simulación

El propósito de este trabajo fue reproducir las condiciones orbitales y características de un satélite en equilibrio virial (sistema en el cual la energía cinética media y potencial media se conservan) sin materia oscura, denominada galaxia satélite que gira alrededor de una galaxia que reúne las condiciones de la Vía Láctea.

Para reproducir la órbita de la galaxia satélite se debe tener en cuenta el tiempo que dicho satélite lleva girando entorno a la Vía Láctea (tiempo de acreción), se ubica a una distancia galactocéntrica a la cual se coloca inicialmente, ya que la influencia del potencial de la Vía Láctea depende de estas variables que afectan la distribución de velocidades y posiciones de la galaxia a simular. Desde este punto de vista las distancias a las cuales se ubican las galaxias satélites simuladas y el tiempo de simulación que tiene que ver con la órbita de los mismos, dependerá del tipo de galaxia enana esferoidal que se estudie.

Galaxias como Carina [52], la Osa menor y Sculptor [9] se caracterizan por su acreción temprana hace aproximadamente 8 Gyr, y para las galaxias de Sextante de 7-9 Gyr y Segue I 7-10 Gyr. Mientras que la galaxia Leo T, acaba de caer a la Vía Láctea, la galaxia Leo I, está saliendo del potencial de la Vía Láctea, después de la primera peregrinación en 2 Gyr [60]. De otro lado las galaxias de Fornax y Hércules [10] que poseen tiempos

de acreción intermedios de 2-8 Gyrs, también podrían ser muy buenos candidatos para la simulación.

Se utilizaron distintas bases de datos tales como Simbad, ApJletters, arXiv.org, ADS, entre otras, con el fin de extraer los datos necesarios para la simulación [48]. Las más estudiadas son las galaxias clásicas dSph ya que cuentan con la suficiente información para poder estudiar todas sus características cinemáticas y dinámicas, mientras que las galaxias UFDGs de reciente descubrimiento [47], se le están realizando nuevos estudios para esclarecer su naturaleza y formación.

De acuerdo con el panorama de las galaxias esferoidales enanas, las galaxias con mayor disposición de datos para realizar este estudio son las galaxias clásicas, conocidas como las dSph. Se revisa a continuación una serie de datos de estas galaxias como la distancia galactocéntrica ( $R_{gc}$ ), las masas de las galaxias ( $M_\odot$ ), el radio de brillo medio ( $r_{1/2}$ ), la dispersión de velocidades sobre la visual ( $\sigma_0$ ), la velocidad radial ( $V_r$ ) y tangencial ( $V_t$ ), así como otros elementos cruciales en la caracterización de estas galaxias; para de este modo determinar los posibles parámetros de la simulación, como la escogencia de las condiciones iniciales y orbitales.

Galaxia	D (Kpc)	$L_\nu \odot$	$R_{gala}$ (Kpc)	$V_r$ (Km/s)	$V_t$ (Km/s)	$V$ (Km/s)	$t_{acre}$ (Gyr)
Ursa Minor	$77 \pm 4$	$3.9^{+1.7}_{-1.3} \times 10^5$	$79 \pm 4$	$-75 \pm 44$	$144 \pm 50$	$162 \pm 49$	8-11
Carina	$105 \pm 2$	$4.3^{+1.1}_{-0.9} \times 10^5$	$107 \pm 2$	$20 \pm 24$	$85 \pm 39$	$87 \pm 38$	7-9
Sculptor	$86 \pm 5$	$2.5^{+0.9}_{-0.7} \times 10^6$	$86 \pm 5$	$79 \pm 6$	$198 \pm 509$	$213 \pm 46$	7-9
Draco	$76 \pm 5$	$2.2^{+0.7}_{-0.6} \times 10^5$	$76 \pm 5$	$-97 \pm 4$	—	—	8-10
Sextans	$96 \pm 3$	$5.9^{+2.0}_{-1.4} \times 10^5$	$99 \pm 3$	$72 \pm 6$	—	—	7-9
Fornax	$147 \pm 3$	$1.7^{+0.5}_{-0.4} \times 10^7$	$149 \pm 3$	$-31.8 \pm 1.7$	$196 \pm 29$	$199 \pm 27$	5-9
Leo II	$233 \pm 15$	$7.8^{+2.5}_{-1.9} \times 10^5$	$235 \pm 15$	$22 \pm 4$	$265 \pm 129$	$266 \pm 129$	1-6
Leo I	$254 \pm 18$	$5.0^{+1.8}_{-1.3} \times 10^6$	$258 \pm 18$	$177 \pm 5$	—	—	$\sim 2$
Ursa Major II	$32 \pm 4$	$4.0^{+2.5}_{-1.4} \times 10^3$	$38 \pm 4$	$-17 \pm 3$	—	—	$\sim 8 - 11$
Bootes I	$66 \pm 3$	$2.8^{+0.6}_{-0.4} \times 10^4$	$64 \pm 3$	$107 \pm 2$	—	—	$\sim 7 - 10$
Segue I	$23 \pm 2$	$3.4^{+3.0}_{-1.6} \times 10^2$	$28 \pm 2$	$111 \pm 4$	—	—	$\sim 7 - 10$
Ursa Major I	$97 \pm 4$	$1.4^{+0.4}_{-0.4} \times 10^4$	$102 \pm 4$	$-11 \pm 3$	—	—	$\sim 6 - 10$
Coma Berenices	$44 \pm 4$	$3.7^{+2.2}_{-1.4} \times 10^3$	$45 \pm 4$	$82 \pm 1$	—	—	$\sim 8 - 11$
Leo IV	$160 \pm 15$	$8.7^{+5.4}_{-3.6} \times 10^3$	$161 \pm 15$	$10 \pm 5$	—	—	$\sim 5 - 9$
Canes Venatici I	$218 \pm 10$	$2.3^{+0.4}_{-0.3} \times 10^5$	$218 \pm 10$	$78 \pm 2$	—	—	$\sim 2 - 7$
Hercules	$133 \pm 6$	$1.1^{+0.5}_{-0.3} \times 10^4$	$127 \pm 6$	$145 \pm 4$	—	—	$\sim 2 - 8$
Willman 1	$38 \pm 7$	$1.0^{+0.9}_{-0.5} \times 10^3$	$43 \pm 7$	$35 \pm 3$	—	—	$\sim 6 - 11$
Canes Venaticae II	$160 \pm 5$	$7.9^{+4.4}_{-3.0} \times 10^3$	$161 \pm 5$	$-96 \pm 1$	—	—	$\sim 1 - 9$
Leo T	$407 \pm 38$	$1.4 \times 10^5$	$412 \pm 38$	$-61 \pm 4$	—	—	i1

Tabla 3: Listado de las galaxias enanas esferoidales dSph y *Ultrafaint*, en gris los posibles candidatos a ser estudiados. dSph clásicas y ultrafaint, características, (tomado de Lokas et al 2009)[32].

De acuerdo con la tabla 3, es posible apreciar que las galaxias dSph clásicas que poseen menor distancia, sin tener en cuenta Sagitario (galaxia más cercana al plano de la Vía Láctea), son Draco, Ursa menor, Sculptor y Sextante; les sigue Carina, Fornax, Leo II y Leo I. De estas, Fornax ha sido muy estudiada por su caprichosa constitución interior con remanentes de miembros cercanos que complejizan su naturaleza estelar, por lo cual sus datos son dependientes de estudios fotométricos más avanzados que cambian constantemente, razón por la cual no sería un buen candidato para este estudio.

De otro lado, no es posible considerar las galaxias Draco, Sextans y Leo I ya que no

cuentan con los parámetros de velocidad ( $V$ ) y velocidad transversal ( $V_t$ ). La Ursa menor se descarta por ser una galaxia satélite irregular, Leo II no se tiene en cuenta por tener un tiempo de acreción muy temprano. Por lo tanto, las mejores candidatas serían Sculptor y Carina.

En la tabla 4 se puede observar la posición de estas galaxias con respecto a la nuestra.

Galaxia	$l(deg)$	$b(deg)$	$d(Kpc)$	$V_r(Km/s)$
UMi	105.0	+44.8	$66 \pm 3$	$-248 \pm 2$
Draco	86.4	34.7	$82 \pm 6$	$-293 \pm 2$
Sextans	243.5	42.3	$86 \pm 4$	$227 \pm 3$
Sculptor	287.5	-83.2	$79 \pm 4$	$108 \pm 3$
Carina	260.1	-22.2	$101 \pm 5$	$224 \pm 3$
Fornax	237.1	-65.7	$138 \pm 8$	$53 \pm 3$
Sagittarius	5.6	-14.1	$24 \pm 2$	$140 \pm 5$
SMC	302.8	-44.3	58	175
LMC	280.5	-32.9	49	324

Tabla 4: Coordenadas Galácticas y distancias, (Lux et al. 2010)[35].

Según la tabla 4, hay gran variedad de distancias con respecto al Sol, la galaxia más cercana al plano galáctico es Sagittarius, y la más alejada de ese disco es Fornax y por encima de la distancia intermedia se encuentra Carina.

Ya que en este estudio es necesario considerar los tiempos de acreción y las distancias para que se puedan simular las condiciones iniciales y definir el potencial de la Vía Láctea, entonces, de acuerdo a la revisión hecha y a los trabajos realizados por Pasetto et al. 2010 [52], Rocha et al. 2011 [56], Casas et al. 2012 [12], Kroupa et al. 1997 [29] y Piatek et al. 2003 [53]; se confirmó la selección de la galaxia Carina teniendo en cuenta su distancia a la Vía Láctea y la disponibilidad de datos observacionales, que serán comparados con los resultados de las simulaciones.

## 2.3. La galaxia esferoidal enana Carina

Una de las galaxias dSph clásicas con mayor disposición de datos, es la galaxia Carina, por el estudio de sus complejas poblaciones estelares, que fueron resueltas por estudios en el componente lumínico de estrellas como RR-lyrae, variables cefeidas, y de la rama horizontal las gigantes rojas [16], las cuales ofrecen pistas sobre su estructura, origen y simetría.

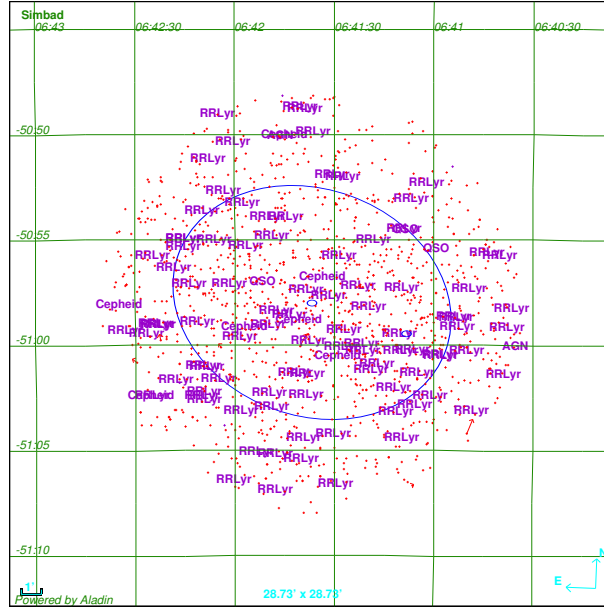


Figura 3: Distribución de RR-Lyrae y cefeidas que conforman el estudio fotométrico de la enana esferoidal Carina, hecha por aladin applet en Simbad (clickable map).

En la figura 3 se muestra la distribución de dos poblaciones, los puntos representan estudios individuales de las estrellas ubicadas en un radio 10 arcmin en coordenadas astronómicas, ascensión recta (A.R)  $06^h41^m36.7^s$  y declinación  $-50^d57^m58^s$ ; al revisar sus posiciones permite pensar qué pasado tuvieron estas estrellas y cuales fueron las interacciones que tuvieron que darse para tener la forma que se observa en la figura, más o menos elipsoidal. Algunas propiedades físicas como la masa total inicial (gas + materia oscura) de estas galaxias son el principal motor de su evolución [54].

Muchos autores han estudiado la historia de formación de estrellas en la galaxia enana de Carina, el estudio demuestra que presenta múltiples poblaciones estelares con diferentes edades que pueden llegar a alrededor de 3 a 9 Gyr y tienen estrellas con edades intermedias en comparación con otras galaxias satélites [35, 43]. A pesar de su baja masa presenta una rica historia química, la mayoría de sus estrellas son de población vieja con bajo contenido metálico ( $-2.9 < [Fe/H] < -1.3$ ) [65], muestran una inhomogeneidad mixta evidenciada en la dispersión  $[Mg/Fe]$  sugiriendo una mezcla de poblaciones antiguas y posiblemente varias épocas de formación estelar [8, 65].

Por otro lado, la observación de los movimientos propios de las dSph es indispensable [3], ya que es posible rastrear su órbita, conociendo la velocidad transversal paralela a la línea de visión. También las componentes angulares detectadas por corrimiento al rojo (redshift) dan indicios sobre la órbita que siguió Carina en su paso por la Vía Láctea

[53, 67].

Parámetros observacionales básicos, tales como distancias, velocidades y características estructurales y dinámicas de la galaxia Carina se ven consignados en la tabla 5. Dichos parámetros son importantes ya que sirven de referencia a la hora de comparar los resultados obtenidos en las simulaciones a llevar a cabo.

Características	Carina
Ascensión recta (A.R)	$06^h 41^m 36.7^s_{[39]}$
Declinación	$-50^d 57^m 58^s_{[39]}$
Posición $l$	$260.1^\circ_{[39]}$
Posición $b$	$-22.2^\circ_{[39]}$
Masa total $M_\odot$	$6.3 \times 10^6_{[39]}, (2 - 20) \times 10^7_{[51]}, 2.73 \times 10^8_{[54]}$
Razón $\frac{M_\odot}{L_\nu \odot}$	$67 \pm 31_{[33]}$
Luminosidad $L_\nu \odot$	$0, 72 \times 10^6_{[54]}, 2, 4 \pm 1.0 \times 10^5_{[68]}$
$\sigma_o$ (km/s)	$6, 6 \pm 1.2_{[39]}$
$\mu_o$ ( $M_v$ )	$2.47 \pm 0.4 \times 10^6 L_\odot / kpc^2_{[37, 39]}, 2.2 \pm 1.0 \times 10^6 L_\odot / kpc^2_{[20]}$ $-9.1 \pm 0.5_{[39]} \text{mag}$
$t_{acr}$ (Gyr)	$7 - 9_{[53]}$
$V_r$ (km/s)	$20 \pm 24_{[53]}$
$V_T$ (km/s)	$85 \pm 39_{[53]}$
Rgc(kpc)	$101 \pm 5_{[32]}$
$r_{1/2}$	$0.210 \text{ kpc}_{[29]}, 0.334 \text{ kpc}_{[39]}$

Tabla 5: Propiedades físicas y cinemáticas de la galaxia enana Carina.  $r_{1/2}$  es el radio de brillo medio;  $\sigma$  es la dispersión de velocidades central;  $L_\nu$  es la luminosidad total;  $M/L$  es la relación masa-luminosidad;  $\mu$ , es el brillo superficial central;  $M_v$  es la magnitud absoluta. Además de estos valores, hay que tener en cuenta que Carina ha estado orbitando a nuestra galaxia al menos durante 7 Gyr aproximadamente (Pasetto et al. 2011) [51], (Casas et al. 2012) [12].  $V_r$  y  $V_T$  son las velocidades radial y tangencial con respecto al centro galáctico. Y Rgc la distancia galactocéntrica de Carina. [39] McConnachie et al. 2012 y Irwin et al 1995 [20], [51] Pasetto et al. 2011, [54] Revaz et al. 2009, [33] Lokas et al. 2010, [68] Walker et al. 2009, [53] Piatek et al. 2003, [32] Lokas et al. 2009, [29] Kroupa et al. 1997.

El presente trabajo se enfoca principalmente en este último grupo de características proponiendo un conjunto de condiciones iniciales que podrían conllevar a la formación de estructuras tipo dSph [33]. Se tiene su distancia apocéntrica y pericéntrica, brillo superficial central en la línea de visión, el radio de media luminosidad, la dispersión de velocidades, excentricidad de su órbita, entre otras, para postular los parámetros de las simulaciones Newtonianas de N-cuerpos. Muy pocos estudios acerca de estas galaxias satélites de la Vía Láctea trabajan con progenitores sin materia oscura, para reconstruir los parámetros cinemáticos y orbitales de Carina.



## 3. Modelo y condiciones iniciales de la simulación

### 3.1. Condiciones iniciales

En esta sección se estudia la evolución del progenitor de la galaxia dSph Carina sin contenido de materia oscura al interactuar con el potencial que genera la Vía Láctea. Los satélites iniciales, que contienen  $10^5$  partículas, se simulan como una esfera de Plummer  $10^6 - 10^8 M_\odot$  y con radios de Plummer entre 0.2-0.8 kpc.

Se tiene en cuenta la evolución en el tiempo de las propiedades cinemáticas y estructurales en la fase cuasi-estable, tales como: la dispersión de velocidades central a lo largo de la línea de visión, el brillo superficial central, el radio medio de luminosidad y la relación masa-luminosidad; dichas variables se han tratado de obtener a partir de diferentes progenitores con diferentes órbitas durante 10 Gyr.

### 3.2. Condiciones orbitales

Para estudiar los elementos orbitales del progenitor de Carina, se tuvo en cuenta las posiciones y velocidades del satélite en diferentes pasos perigalácticos durante 10 Gyr. La excentricidad y las distancias pericéntrica y apocéntrica, se tomaron de las condiciones actuales de la galaxia enana Carina.

Características Orbitales	Valor
Distancia Perigaláctica	$R_p = 20$ kpc
Distancia Apogaláctica	$R_a = 102$ kpc
Excentricidad	$e = 0.68$
Periodo	$T = 1.4$ Gyr
Inclinación	$\phi = 39$
Longitud	$\Omega = 67$

Tabla 6: Elementos Orbitales actuales de Carina (Piatek et al. 2003)[53].

Posiciones y Velocidades	Valor
Posición x	24 kpc
Posición y	91 kpc
Posición z	-38 kpc
Velocidad	$V_T = 85 \pm 39$ km/s
Velocidad	$V_r = 20 \pm 39$ km/s

Tabla 7: Posiciones y Velocidades actuales (Piatek et al. 2003)[53].

Las características orbitales junto con las posiciones y velocidades, descritas en las tablas 6 y 7 [53] y [39], son de vital importancia para determinar las características iniciales de Carina. Respecto a las posiciones, [53], reporta ciertos valores para las posiciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ , las cuales se obtuvieron mediante la simulación de la galaxia Carina en un potencial

rígido, para la Vía Láctea, durante 3 Gyr.

Para generar la órbita en el programa Gadget2 las posiciones se calcularon de acuerdo al modelo de Johnson y Soderblom (1987) [21] que involucra la imposición de una doble reflexión para el eje  $X$  positivo origen del centro galáctico y el eje  $Y$  positivo que señala la disminución de la longitud galáctica:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} d \begin{pmatrix} \cos(b)\cos(l) \\ \cos(b)\sin(l) \\ \sin(b) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{\odot} \\ y_{\odot} \\ z_{\odot} \end{pmatrix}$$

Donde  $\mathbf{x} = (x, y, z)$  es la posición genérica de la galaxia enana,  $\mathbf{x}_{\odot} = (x_{\odot}, y_{\odot}, z_{\odot}) \cong (8.5, 0, 0)$  es la posición del Sol asumida por simplicidad en el plano de la Vía Láctea y  $(l, b)$  las coordenadas galácticas que pueden ser derivadas de

$$\begin{pmatrix} \cos(b)\cos(l) \\ \cos(b)\sin(l) \\ \sin(b) \end{pmatrix} = (\mathbf{T}^{-1}) \begin{pmatrix} \cos(\delta)\cos(\alpha) \\ \cos(\delta)\sin(\alpha) \\ \sin(\delta) \end{pmatrix}$$

Teniendo en cuenta que  $\mathbf{T}$  es

$$\begin{pmatrix} 0.0534 & 0.8750 & 0.4810 \\ +0.4939 & 0.4418 & +0.7488 \\ -0.8678 & 0.1975 & +0.4558 \end{pmatrix}$$

Del mismo modo, podemos derivar el campo de velocidades teniendo en cuenta este tratamiento [52]. Se consideraron las tablas 6 y 7 para asignar los parámetros al Gadget2 y poner a interactuar la Vía Láctea y la galaxia enana bajo las condiciones mostradas.

De otro lado, mediante el uso de un programa integrador en el tiempo, fue posible determinar los parámetros iniciales de la simulación con base en los valores reportados.

La órbita tuvo en cuenta el modelo de potencial rígido para la Vía Láctea, por las masas escogidas entre  $10^6 - 10^8 M_{\odot}$ , también se tuvo en cuenta que no se presentarán efectos de fricción dinámica. Para la construcción de la órbita es útil escoger un sistema de referencia ubicado en un sistema de coordenadas con origen en el centro galáctico. El plano del disco galáctico coincidió con el plano (xz) y la ubicación actual del Sol está en ese plano.

En la figura 4, se muestra la trayectoria de una partícula de prueba simulada para 10 Gyr (se tuvo en cuenta el tiempo de acreción de Carina que esta entre 8-10 Gyr), realizando un cálculo hacia atrás en el tiempo con un programa en C, que se alimentó con las condiciones de la tabla 5. De acuerdo con los datos arrojados por el programa fue posible notar los diferentes pasos perigalácticos que ha tenido Carina, todo esto con el fin de establecer las condiciones iniciales de las posibles órbitas del progenitor de Carina. Los valores de posición, velocidad radial y velocidad tangencial iniciales de esta partícula de prueba se tomaron a partir de los datos reportados por [53] en la tabla 7 y corresponden a los valores actuales medidos de Carina. Desde el punto de vista observacional es más fácil establecer los valores de la velocidad radial y no los de la velocidad transversal, ya que los valores de la velocidad radial se pueden determinar a partir del corrimiento Doppler

de la luz en la línea de visión (espectro estelar); en cambio se necesita de análisis del movimiento propio del sistema como una medida indirecta de la velocidad tangencial.

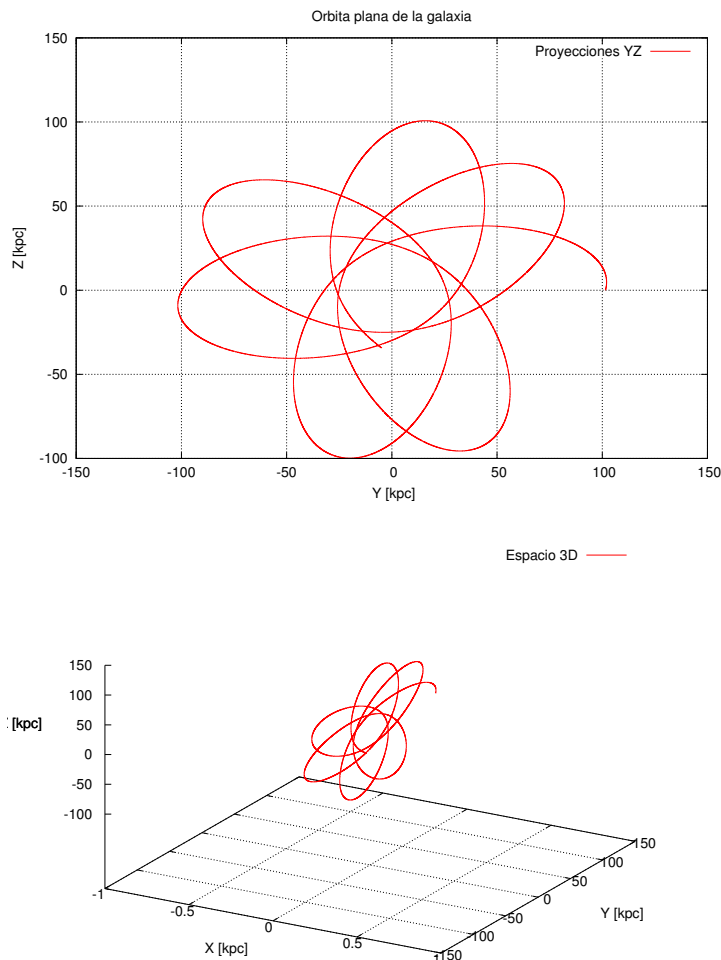


Figura 4: Órbita de Carina para 10 Gyr plano YZ y en 3D teniendo en cuenta los parámetros de las tablas 6 y 7.

En la tabla 8 se muestran las condiciones iniciales para la simulación de posibles progenitores de la galaxia Carina, mediante el uso del programa Gadget2. Para las diferentes simulaciones se modificaron, la masa del progenitor y los radios de Plummer, con el fin de comparar los valores obtenidos para los parámetros de dispersión de velocidades, radio de brillo medio, razón masa-luminosidad y brillo superficial, con los valores reportados en la tabla 5.

Parámetros iniciales	Valor
Partículas	$10^5$
Masa Carina	$10^6 - 10^8 M_\odot$
Radio de Plummer	0.2-0.8 kpc
$V_T$	86 km/s
$V_r$	220 km/s
Tiempo	10 Gyrs
Posición x	86.092
Posición y	36.603
Posición z	-35.303
Velocidad (x)	71.315
Velocidad (y)	-40.268 km/s
Velocidad (z)	26.155 km/s

Tabla 8: Las posiciones (x,y,z) están en coordenadas galactocéntricas. En color gris se destacan los parámetros que se modificaron en cada una de las simulaciones. Los valores de posición y velocidad fueron obtenidos del programa integrador.

### 3.3. Modelo para la Vía Láctea

La Vía Láctea se modela usando un potencial rígido con tres componentes: un potencial Miyamoto Nagai para el disco:

$$\phi_{disco}(R, z) = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + (a + \sqrt{z^2 + b^2})^2}}, \quad (1)$$

un potencial esférico de Hernquist para el núcleo:

$$\phi_{nucleo}(R) = -\frac{GM_e}{R + c}, \quad (2)$$

y un potencial logarítmico para el halo de materia oscura:

$$\phi_{halo}(R) = v_c^2 \ln[R^2 + d^2] \quad (3)$$

donde  $R^2 = x^2 + y^2$ ,  $M_d = 10^{11} M_\odot$  es la masa del disco,  $a = 6.5$  kpc,  $b = 0.26$  kpc son constantes para determinar la geometría del disco;  $M_e = 3.4 \times 10^{10} M_\odot$  es la masa del núcleo y  $c = 0.7$  kpc es un parámetro de concentración;  $d = 12$  kpc y  $v_c = 128$  km/s son constantes para definir la distribución de la densidad en el halo. Estos potenciales y los parámetros correspondientes se han elegido ya que se asemejan a las condiciones de la Vía Láctea [22].

En este modelo, los satélites esféricos inicialmente virializados (la energía cumple con  $2\langle T \rangle + \langle V \rangle = 0$ ) y teniendo en cuenta los valores en la tabla 8 de condiciones iniciales se introducen los parámetros el programa Gadget2 para interaccionar las dos galaxias, la enana con un potencial tipo Plummer y la Vía Láctea con un modelo de potencial rígido de 3 elementos. La velocidad del satélite depende de la excentricidad de la órbita y del potencial de la galaxia anfitriona. La evolución del satélite que da vueltas alrededor de la Vía Láctea ha sido simulada encontrando una órbita para los 10 Gyr en forma de roseta ver la figura 4.

Al trabajar con un potencial rígido suponemos que no existe fricción dinámica, es decir, no hay transferencia de momento angular a las partículas, las galaxias satélite no pierden energía cinética. Dado que la masa máxima inicial de los progenitores a simular es  $\sim 10^8 M_\odot$ , los efectos de fricción dinámica son despreciables

### 3.4. Modelo para el satélite

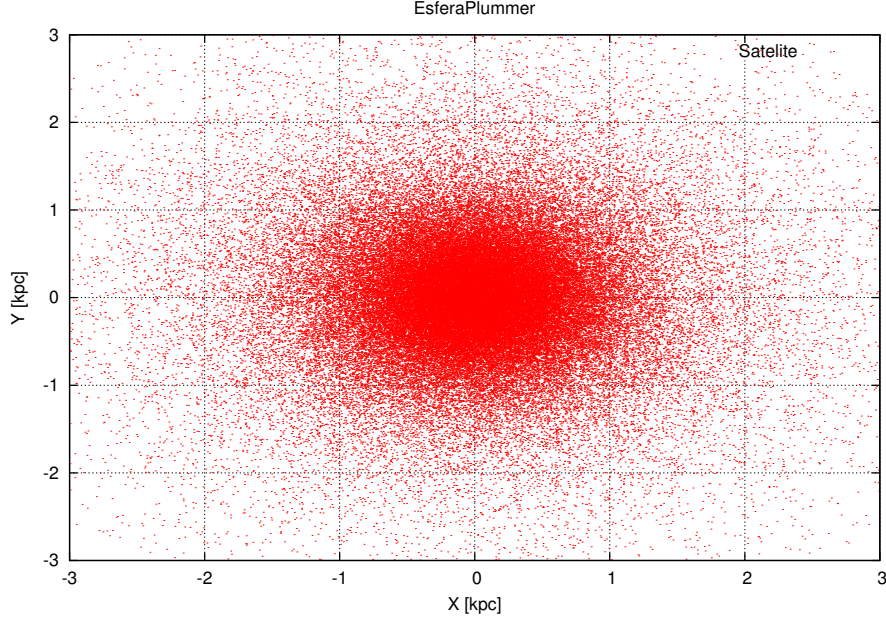


Figura 5: Forma del satélite, potencial de Plummer.

El Progenitor de Carina se modela como una esfera de Plummer (figura 5) con  $10^5$  partículas. El potencial de Plummer tiene la forma:

$$\phi_{Pl}(r) = \frac{GM_{sat}}{\sqrt{r^2 + R_{pl}^2}}, \quad (4)$$

en donde  $M_{sat}$  es la masa del satélite y  $R_{pl}$  es el radio de Plummer. También se tiene la densidad  $\rho(r)$  en términos de la distancia  $r$  y el radio de Plummer:

$$\rho(r) = \left( \frac{3M_{sat}}{4\pi R_{pl}^3} \right) \left[ 1 + \frac{r^2}{R_{pl}^2} \right]^{-5/2} \quad (5)$$

Parámetros	Valores
Masa de los Satélites	$1 \times 10^6 M_\odot - 1 \times 10^8 M_\odot$
Radios de Plummer	0.2-0.8 kpc

Tabla 9: Parámetros usados en el progenitor de Carina

Los satélites han sido construidos utilizando el algoritmo propuesto por Aarseth, Hénon y Wielen (1974). Puesto que cada satélite no es discretizado en completo equilibrio,

es necesario virializar el sistema de partículas bajo su propia gravedad. Por lo tanto, la evolución del objeto aislado es simulada por 10 Gyr utilizando Gadget-2 hasta que se alcanza el equilibrio virial. En la figura 6, se muestra la virialización de uno de los satélites simulados, donde se aprecia que los radios lagrange no cambian durante todo el tiempo, indicándonos que este satélite está en equilibrio virial. El proceso de virialización se realiza para todos los satélites iniciales simulados.

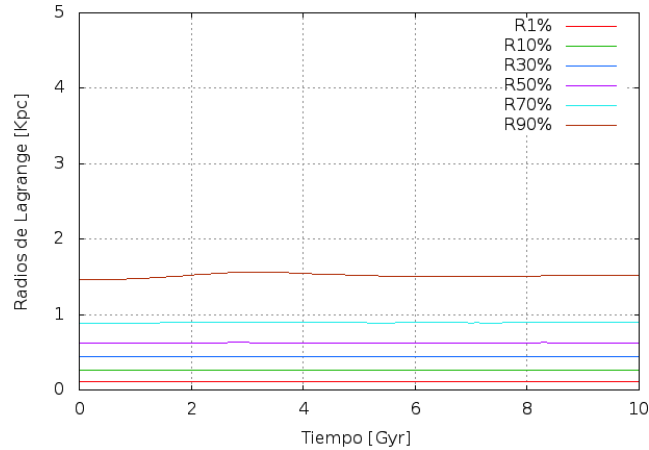


Figura 6: Radios de Lagrange en función del tiempo para un satélite con masa  $10^6 M_\odot$  y  $R_p = 0.4$  kpc.

En la figura 7, se muestra la energía del satélite, donde se observa que las energías mostradas cumplen con el teorema del virial.

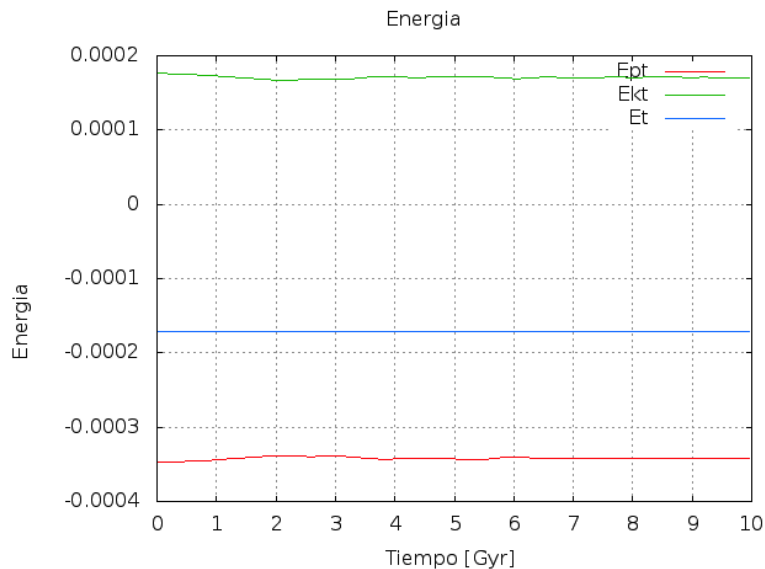


Figura 7: Energías para el satélite, donde se observa la energía cinética (verde), potencial (roja) y mecánica total (azul). La energía virial tiene unidades gadget ( $10^{10} M_\odot km^2/s^2$ )

### Teorema del virial para un sistema autogravitante:

Se puede considerar que un sistema de partículas que conforman un sistema autogravitante cumple con un potencial asociado a la fuerza:

$$\mathbf{F}_i = - \sum_{j \neq i} G \frac{m_i m_j (x_i - x_j)}{|x_i - x_j|^3} \quad (6)$$

Donde  $m_i$  y  $m_j$  representan las masas de las partículas y  $x_i$  y  $x_j$  las posiciones de las mismas; se puede apreciar en esta ecuación que para encontrar una solución general de la fuerza se requiere una doble suma, por lo tanto el costo computacional es grande, además se puede apreciar que no depende de las condiciones iniciales. Otro hecho bien importante es que cuando dos partículas tienden a estar unidas la fuerza gravitacional diverge, lo cual genera aceleraciones elevadas. Este problema puede ser resuelto introduciendo una cantidad llamada longitud de suavizado o *smoothing length*, la cual modifica la interacción gravitacional a diminutas escalas, con lo cual la fuerza sería:

$$\mathbf{F}_i = - \sum_{j \neq i} G \frac{m_i m_j (x_i - x_j)}{((|x_i - x_j|^2) + sl^2)^{3/2}} \quad (7)$$

Físicamente, se podría interpretar esta longitud de suavizado como la distancia entre los centros de dos partículas que están unidas.

Por otro lado, podemos establecer el teorema del virial para un sistema de partículas extraído de la mecánica estadística, que nos ayuda a entender la energía de un sistema de partículas sometidas a fuerzas centrales.

Se tiene en cuenta para un conjunto de puntos materiales los vectores de posición  $\mathbf{r}_i$  y fuerzas aplicadas  $\mathbf{F}_i$ . Las ecuaciones de movimiento <sup>4</sup> que describen el sistema material son:

$$\dot{\mathbf{P}}_i = \mathbf{F}_i \quad (8)$$

Nos interesa la cantidad

$$A = \sum_i \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{r}_i \quad (9)$$

en donde la sumatoria se extiende a todas las partículas del sistema. La derivada temporal total de esta cantidad es

$$\frac{dA}{dt} = \sum_i \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \mathbf{P}_i + \sum_i \dot{\mathbf{P}}_i \cdot \mathbf{r}_i \quad (10)$$

El primer término puede transformarse en la forma:

$$\sum_i \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \mathbf{P}_i = \sum_i m_i \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \dot{\mathbf{r}}_i = \sum_i m_i v_i^2 = 2T$$

---

<sup>4</sup>tomado de la mecánica clásica de Herbert Goldstein

mientras que el segundo, en virtud de la ecuación (8) es

$$\sum_i \dot{\mathbf{P}}_i \cdot \mathbf{r}_i = \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i \quad (11)$$

Por tanto, las ecuaciones (10) se reducen a

$$\frac{d}{dt} \sum_i \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{r}_i = 2T + \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i \quad (12)$$

La media temporal de la ecuación (12) para un intervalo  $\tau$  se obtiene integrando los dos miembros respecto a  $t$  entre 0 y  $\tau$  y dividiendo por  $\tau$ :

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{dA}{dt} dt \equiv \frac{\overline{dA}}{dt} = \overline{2T} + \overline{\sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i} \quad (13)$$

entonces

$$\overline{2T} + \overline{\sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i} = \frac{1}{\tau} [A(\tau) - A(0)] \quad (14)$$

Si el movimiento es periódico, es decir, si todas las coordenadas se repiten al cabo de cierto tiempo y si se toma  $\tau$  de manera que sea periódico, el segundo término de la ecuación (14) se anulará. Podemos llegar a una conclusión análoga aún cuando el movimiento no sea periódico, con tal que las coordenadas y velocidades de todas las partículas se mantienen finitas de manera que haya un límite superior de  $A$ . Tomando  $\pi$  muy grande, el segundo miembro de la ecuación (14) se puede hacer tan diminuto como queramos. En ambos casos se deduce

$$\overline{T} = -\frac{1}{2} \overline{\sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i} \quad (15)$$

La ecuación (15) se conoce como el teorema del Virial, establece la relación entre la energía cinética total promedio de un sistema con su energía potencial promedio  $V$ . Para sistemas gravitatorios como en nuestro estudio, podemos decir,

$$\frac{dA}{dt} = 2T + V_{Tot} \quad (16)$$

Por las condiciones mencionadas antes  $\frac{dA}{dt} = 0$ , entonces

$$2\overline{T} = -\overline{\sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i} \quad (17)$$

Si se examina un sistema de objetos en el espacio y se es capaz de medir la energía cinética del sistema, entonces se puede inferir la energía potencial gravitatoria. Si la masa total de todos los objetos visibles es demasiado pequeña para dar esa cantidad de energía potencial gravitatoria, entonces implica que allí posiblemente puede haber presencia de materia que no se puede ver (materia oscura).



### 3.5. Propiedades físicas a estudiar en la evolución de los satélites sin materia oscura

Las propiedades físicas que se determinaron fueron: el radio de brillo medio,  $r_{1/2}$ ; el brillo superficial central,  $\mu_0$ ; la dispersión de velocidades central sobre la visual,  $\sigma_0$ , y la relación masa-luminosidad aparente,  $(M/L)_0$ . Se debe tener en cuenta que los correspondientes valores actualmente medidos para la galaxia enana de Carina respecto a las propiedades nombradas anteriormente, se encuentran en la tabla 5.

#### 3.5.1. Relación masa-luminosidad aparente

La relación masa-luminosidad del satélite, proyectada en proporción al modelo del núcleo [55, 58], se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{M}{L}\right)_{obs} = \left(\frac{9}{2\pi G}\right) \left(\frac{\sigma_o^2}{\mu_0 r_{1/2}}\right), \quad (18)$$

donde  $G$  es la constante gravitacional,  $\sigma_o$  es la dispersión de velocidad central del objeto proyectado,  $\mu_o$  es la densidad de superficie de brillo central y  $r_{1/2}$  es el radio de brillo medio. Cabe resaltar que la razón corresponde a valores de masa total y luminosidad total de una galaxia. Estos valores varían de galaxia a galaxia según el tipo de Hubble, siendo mayor para las galaxias tardías, y también dentro de la misma galaxia a lo largo del radio, son mayores para radios externos. Para nuestro caso el Grupo Local toma valores entre 3 y 5 [7], si un sistema estelar tiene valores de 10 o más en su razón  $M/L$  podría indicar que estos sistemas pueden tener presencia de materia oscura [25].

#### 3.5.2. Brillo superficial central

A partir de la radiación electromagnética que llega a nosotros, se puede tener información acerca de los cuerpos celestes tales como estrellas, galaxias, cúmulos, entre otros. Si se toma una galaxia, un objeto extendido por varios segundos o minutos de arco y se determina su brillo superficial aparente, va a ser significativamente diferente en comparación con objetos más pequeños que podemos considerar como puntos en la gran mayoría de las observaciones, es decir, las estrellas. Considerando el brillo superficial como la cantidad total de luz que llega de una galaxia, es posible determinar, qué tan fácilmente se puede observar. Así mismo un objeto de magnitud aparente  $m$  que se extiende por un área  $\mathbf{a}$  medida en  $arcsec^2$ , tendrá un brillo superficial que puede determinarse mediante la expresión:

$$\mu_0 = m + 2.5 \log(\mathbf{a}), \quad (19)$$

donde  $m$  es la magnitud aparente (un número), se mide en una escala logarítmica, se utiliza para indicar el brillo relativo de un cuerpo celeste. Si el número de magnitud es pequeño, mayor es el brillo. Se puede apreciar que depende de la magnitud del área de la galaxia ( $\mathbf{a}$ ) y cuanto más grande sea, mayor será su radio. El radio para el cual el brillo superficial disminuye  $0.75 \text{ mag}/arcsec^2$  se denomina radio de brillo medio [7].

Es de especial importancia contar con este valor en las simulaciones, ya que al interaccionar el satélite con el potencial de la Vía Láctea, es posible apreciar la variación de su brillo y luminosidad y, en consecuencia, cuanta masa aporta al valor del brillo.

### 3.5.3. Dispersión de velocidades central sobre la visual

En una galaxia se puede observar que el valor de la velocidad cambia con respecto a la distancia a la cual nos encontremos para medirla. Considerar estadísticamente las velocidades de un grupo de estrellas en comparación de una medida central se denomina *dispersión de velocidades*.

El método para calcular esta cantidad fue hecho por [5], considera el movimiento de las estrellas a partir de un observador terrestre ubicado en el centro galáctico, se debe tener en cuenta el movimiento propio de las estrellas para determinar el módulo de distancia. Al comparar las medidas obtenidas por este método, también se tiene en cuenta la velocidad radial del grupo de estrellas que puede obtenerse por métodos espectrales [25].

## 4. Simulaciones Numéricas

### 4.1. Gadget-2 un código para realizar simulaciones Newtonianas de N-cuerpos

En el estudio de las galaxias enanas esferoidales es de crucial importancia contrastar los modelos teóricos con los datos observacionales, desde este punto de vista las simulaciones hechas en el computador cobran importancia, por lo menos en cosmología donde es difícil establecer una comparación experimental debido a las grandes distancias y enormes escalas de tiempos en el análisis de la gran estructura en el universo; en nuestro caso, a escalas locales, los métodos numéricos Newtonianos de N-cuerpos nos brindan la posibilidad de comparar las estructuras y cinemática utilizando un arreglo de partículas.

El programa Gadget2, que es un programa de libre acceso y muy acoplable a un sin número de problemas físicos, nos da la oportunidad de realizar comparaciones que pueden ser Newtonianas o Cosmológicas en las cuales se pueden usar coordenadas físicas o comóviles y en donde opcionalmente, las condiciones de frontera podrían ser periódicas. En este trabajo se realizaron simulaciones newtonianas con coordenadas físicas.

En todos estos tipos de simulaciones, Gadget2 recorre la evolución en el tiempo de un sistema de N-cuerpos no colisionales autogravitantes, y permite incluir opcionalmente dinámica de gases.

#### ¿Qué es GADGET?

**GA**laxies with **D**ark matter and **G**as int**E**ract o **G**adget, es un código de libre acceso con el cual se pueden desarrollar simulaciones cosmológicas e hidrodinámicas de N-cuerpos. La fuerza gravitacional de corto alcance es hallada mediante una expansión multipolar jerárquica o lo que se conoce como algoritmo de árbol mientras que las fuerzas de largo alcance son determinadas con técnicas de Fourier a través del algoritmo TreePM (particle-mesh). Para modelar fluidos, Gadget utiliza hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH) Volker Springel, 2005.

#### Ventajas de utilizar Gadget2

1. Es portátil, se puede instalar en cualquier computador con núcleos internos e inclusive portátil, el único requisito es que esté en plataforma Linux.
2. Versátil, este código ha sido usado para realizar las primeras simulaciones cosmológicas de N-cuerpos con más de  $10^{10}$  partículas de materia oscura; obviamente con el centro de computo adecuado.
3. Puede correr en paralelo utilizando cualquier número de núcleos; esto lo hace gracias a la interface de comunicación MPI; debido a esto, Gadget2 puede ser utilizado en cualquier tipo de máquina, desde super clusters hasta equipos portátiles.
4. Diferentes procesos físicos pueden ser estudiados tales como: enfriamiento radiativo y calentamiento por fotoionización, formación estelar y procesos de feedback; se ha estudiado también el problema de la conducción térmica en un gas caliente ionizado.

Algunos pasos seguidos para realizar el estudio que nos ocupa:

1. Se definen las condiciones iniciales tales como: velocidades  $V_r$  y  $V_T$ , las distancias apocéntrica y pericéntrica, la excentricidad de la órbita y por último la masa del satélite y el radio de Plummer, todas estas con base datos actuales de observación.
2. Se construye la galaxia progenitora de Carina, teniendo en cuenta las condiciones iniciales, suponiendo un potencial de Plummer para el satélite.
3. El satélite se deja autogravitando por 10 Gyr (virialización).
4. La galaxia virializada se pone en interacción con el potencial rígido de la Vía Láctea.
5. Se comparan las simulaciones obtenidas con los datos observacionales de Carina, en cuanto al brillo superficial central, la dispersión de velocidades, el radio medio de brillo y la razón masa-luminosidad (M/L).

Las simulaciones hechas en este estudio se ejecutaron para 10 Gyr guardando un archivo de datos cada 0.1 Gyr, estos archivos de salida del Gadget2 contienen las posiciones y velocidades de las partículas del satélite. Se usó un softening length de 7 pc.

## 4.2. Evolución de posibles progenitores de Carina sin materia oscura

En esta sección se estudia el resultado de las simulaciones, comparando el comportamiento de las galaxias enanas en cuanto a cinemática y evolución temporal. De igual forma, se considera el estudio bajo diferentes variaciones de masas y radio inicial de Plummer.

### 4.2.1. Radio de Plummer diferente

Los satélites se construyen con potenciales de Plummer, al revisar la construcción de diferentes radios iniciales es posible establecer qué ocurre con el comportamiento de los satélites al interaccionar con el potencial rígido de la Vía Láctea.

En la figura 8, se muestran dos diferentes radios de Plummer:  $R_p = 0.3$  kpc y  $R_p = 0.6$  kpc. Se observa que para el menor radio de Plummer (gráfica superior) la gráfica para el radio de Lagrange R50 % cambia hasta aproximadamente los 4 Gyr, esto se debe a que es el más denso. Al observar la gráfica inferior, radio de Plummer 0.6 kpc, nos damos cuenta que el radio de lagrange R50 % cambia más tempranamente; entre más grande sea el radio de Plummer, menos compacto el objeto será, y por tal motivo se desgarrará más fácilmente en presencia del potencial de la Vía Láctea.

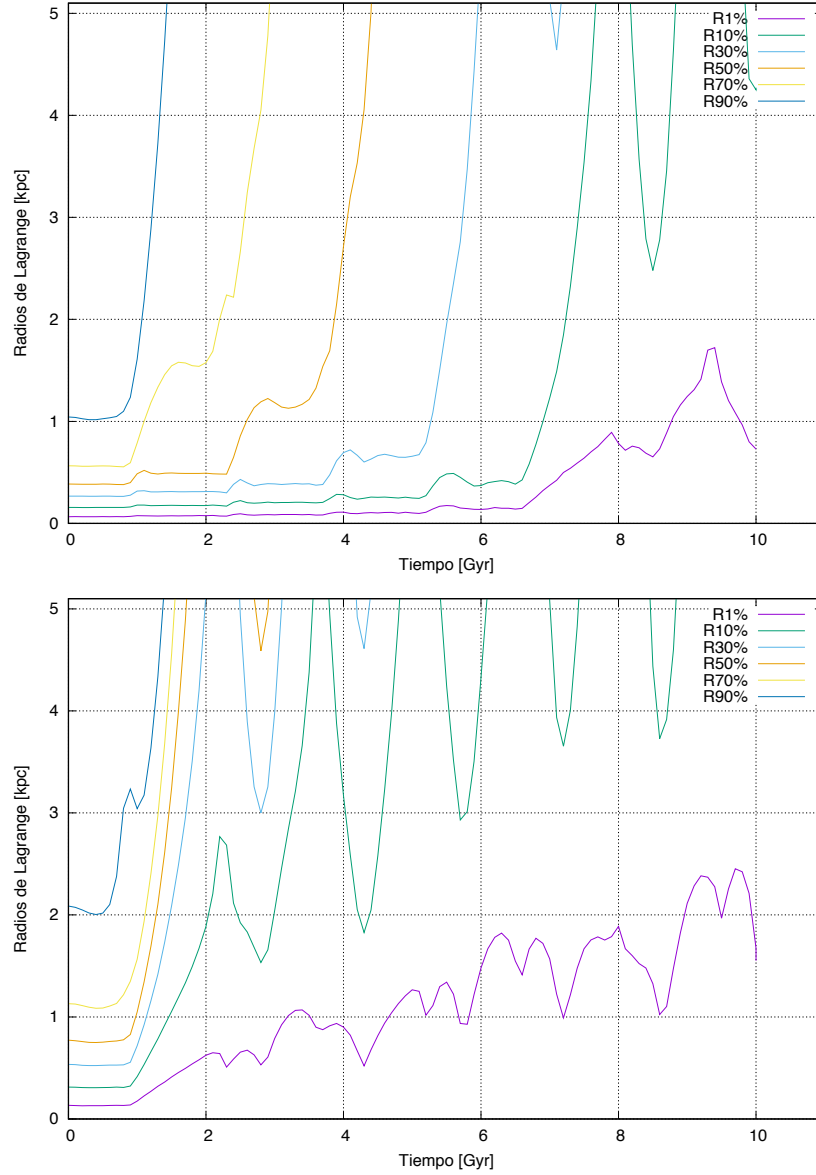


Figura 8: Se muestran los radios de Plummer  $R_p = 0.3$  kpc (gráfica superior) y  $R_p = 0.6$  kpc (gráfico inferior) con una masa de  $10^7 M_\odot$  y una distancia apocéntrica de 100 kpc

#### 4.2.2. Masa diferente

En la figura 9, se estudia el comportamiento de satélites con masa inicial de  $1 \times 10^6 M_\odot$ ,  $1 \times 10^7 M_\odot$  y  $1 \times 10^8 M_\odot$  y radio de Plummer similar. Se puede observar que, a medida que aumenta la masa del satélite, estos cuerpos tienden a destruirse en tiempos más tempranos, con radios de Plummer similares. Si las masas de los satélites son grandes, se destruirán un poco más rápido, sufriendo fragmentación.

De otro lado, se puede ver claramente en los radios de Lagrange, para las masas  $10^6 M_\odot$ ,  $10^7 M_\odot$  y  $10^8 M_\odot$ , que la franja de color amarillo oscuro que corresponde a un radio de Lagrange  $R50\%$  a medida que la masa crece esta franja se va corriendo a valores que superan los 4 kpc y luego queda constante, sugiriendo que a mayores masas ( $10^7 M_\odot$  y  $10^8 M_\odot$ ) tienden a hacer más estable el satélite y no se desgarran tan rápido.

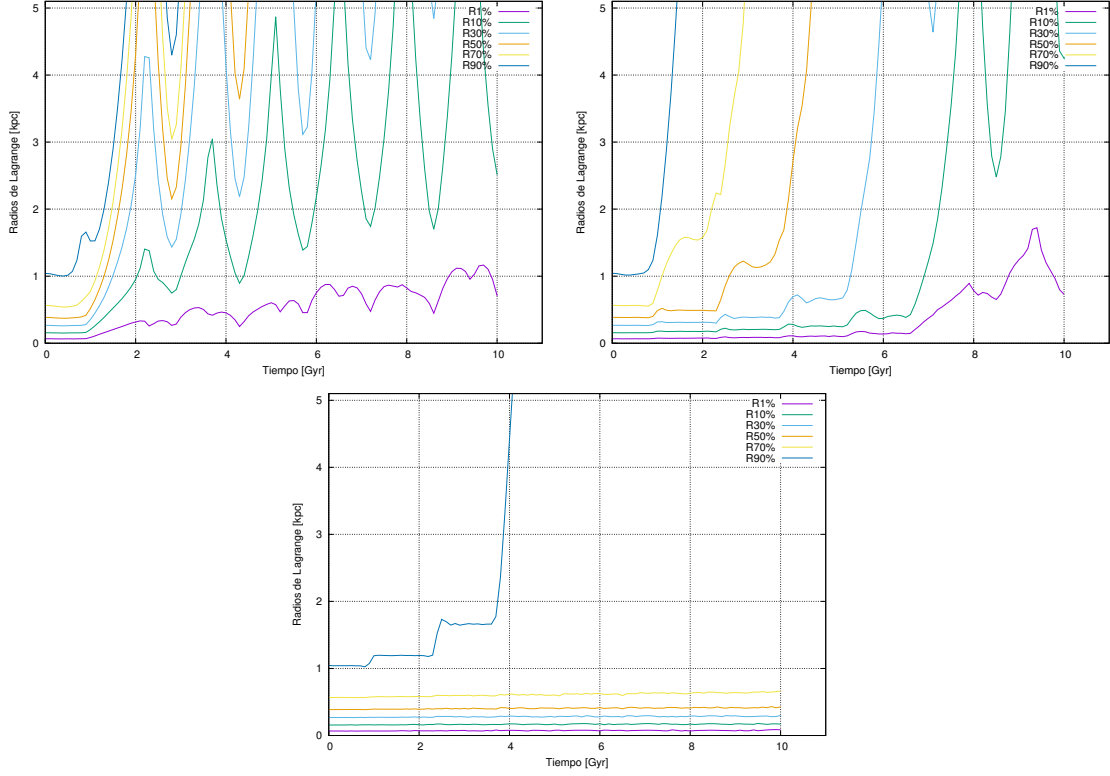


Figura 9: Se muestran satélites con  $R_p = 0.3$  kpc y masas  $1 \times 10^6 M_\odot$  (Izquierda superior),  $1 \times 10^7 M_\odot$  (derecha superior);  $1 \times 10^8 M_\odot$  (inferior) con una distancia apocéntrica de 100kpc

### 4.3. Comparación con Carina

En esta sección se comparan las propiedades físicas de los satélites simulados con las actualmente observadas en la galaxia enana Carina, con el fin de conocer las características del posible progenitor de esta galaxia.

El principal criterio para realizar la comparación de las propiedades cinemáticas del satélite de Carina, consiste en revisar los valores observacionales de la relación  $M/L$  en diferentes intervalos de tiempo, ya que si esta toma los rangos establecidos en la literatura (valores observacionales, franjas verdes horizontales), las demás variables que dependen de esta característica como el radio de brillo medio ( $r_{1/2}$ ), la dispersión de velocidades sobre la visual ( $\sigma_0$ ) y el brillo superficial central ( $\mu_0$ ), también lo harán.

En las gráficas contenidas en la figura 10, se muestra la evolución temporal de las propiedades físicas tales como: el radio de brillo medio ( $r_{1/2}$ ), la dispersión de velocidades central sobre la visual ( $\sigma_0$ ), la distancia galactocéntrica ( $R_{gc}$ ), el brillo superficial central ( $\mu_0$ ), la relación masa-luminosidad ( $M/L$ ) y la gráfica de los radios de Lagrange de los de diferentes sistemas esferoidales durante un tiempo de 10 Gyr. Estas propiedades físicas son determinadas para un observador ubicado en la Tierra.

#### 4.3.1. Satélites con masa $10^6 M_\odot$

Satélite con masa inicial de  $1 \times 10^6 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.2 y 0.3 kpc:

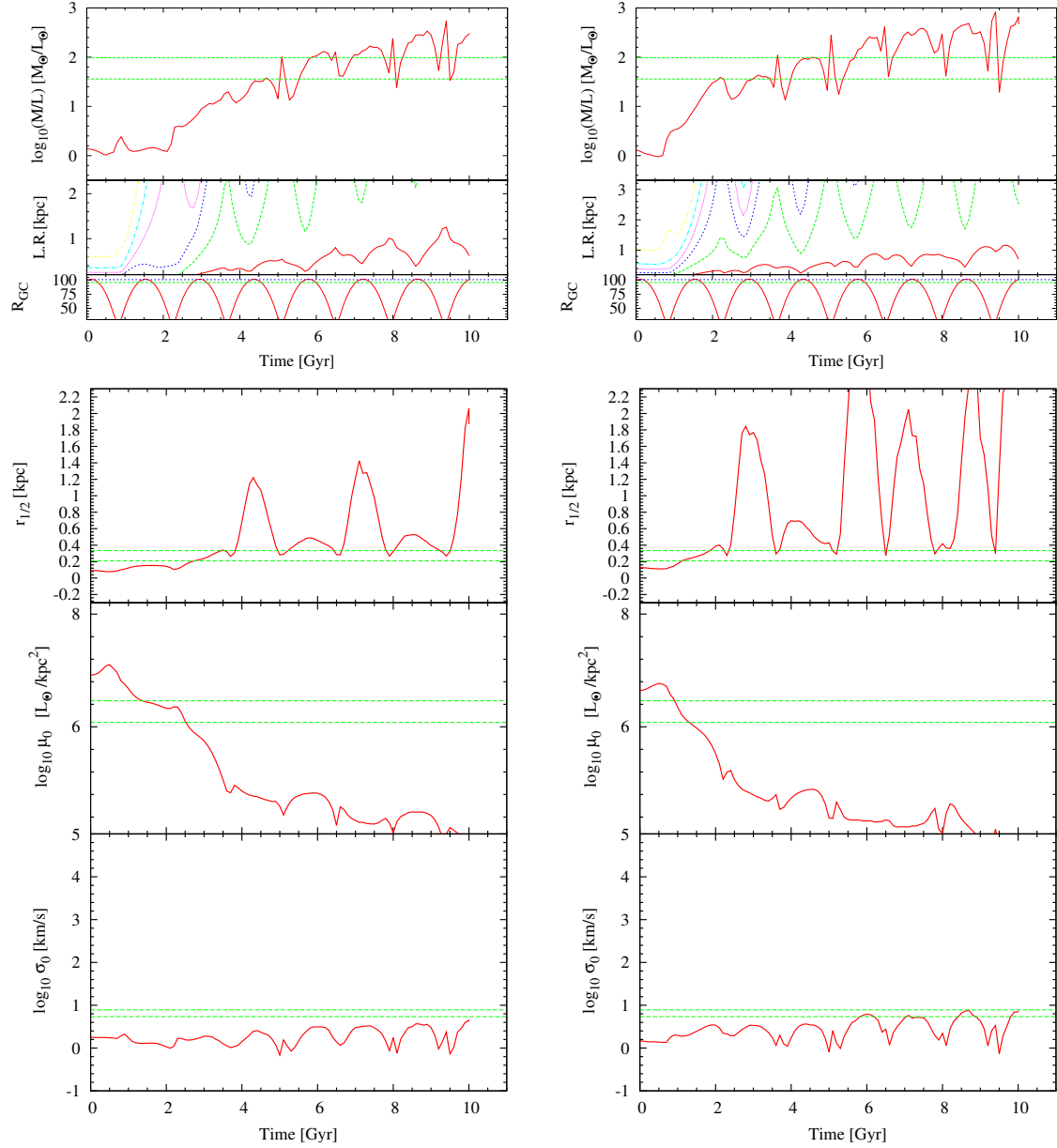


Figura 10: Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^6 M_\odot$ . (a) con un radio de Plummer de 0.2 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con un radio de Plummer de 0.3 kpc (gráficas columna de la derecha). En la parte central de las gráficas tanto (a) y (b) superior se ubica los radios de Lagrange (L.R. [kpc]) de colores se pueden apreciar color rojo radio de Lagrange  $R1\%$  de su masa, color verde  $R10\%$ , color azul  $R30\%$ , color fucsia  $R50\%$ , en color azul claro  $R70\%$  y amarillo  $R90\%$ .

Al revisar la relación  $M/L$  para la figura 10(a) se puede apreciar que se incrementa a partir de los 2 Gyr y fluctúa durante la evolución del satélite. Adicionalmente esta variable alcanza valores observacionales aproximadamente a los 5 Gyr y en otros intervalos tales como: 6.5-7 Gyr, 8-8.5 Gyr, y el último intervalo 9.5-10 Gyr (líneas verdes en las figuras).

Para los radios de Lagrange, se puede observar que durante los primeros 2 Gyr, el satélite pierde el 50 % de su masa en la interacción con la Vía Láctea. Por otro lado, en cuanto a la distancia galactocéntrica coincide con los valores observacionales en los puntos 6 y 7 Gyr en comparación con los otros intervalos de  $M/L$ , en donde no coincide.

Se puede observar que la gráfica del brillo superficial central decae rápidamente y toma valores observacionales de 1.5 a 2.5 Gyr aproximadamente, dicho comportamiento es similar para el mismo parámetro evaluado en la figura 10(b). Estos decaimientos en ambas gráficas del brillo superficial central, podrían estar asociados con la fluctuación del radio medio donde se concentra la masa del satélite.

La dispersión de velocidades, presenta un comportamiento casi constante a lo largo de la simulación y dichos valores observacionales no alcanzan en ningún momento los valores esperados para este satélite.

En la tabla 10 se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo (en la tabla aparece como (si)), mientras las variables que no reproducen los valores observacionales este representadas con una la (-).

	5 Gyr	(6.5-7) Gyr	(8-8.5) Gyr	(9.5-10) Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	—	—	si	—
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	—	—	—
$R_{gc}(kpc)$	—	si	—	—

Tabla 10: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.2kpc$  y una masa de  $1 \times 10^6 M_{\odot}$

En el primer intervalo de la relación  $M/L$  (a los 5 Gyr) ninguno de los parámetros coincide con el valor observacional de Carina. Por su parte en el intervalo de 6.5-7 Gyr coinciden solo la variable  $R_{gc}$ . En el tercer intervalo de 8-8.5 Gyr sólo coincidió una variable  $r_{1/2}$ ; y para el último intervalo de 9.5-10 Gyr ninguna de las variables coincidió con los valores observacionales de Carina. De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar que este satélite con estas características no puede ser el progenitor de Carina.

Para que se pueda considerar como un posible progenitor de la galaxia Carina, todos los parámetros ( $\sigma_0$ ,  $\mu_0$ ,  $r_{1/2}$ ),  $M/L$  y  $R_{gc}$  del satélite simulado deben coincidir en el mismo intervalo observacional de la razón  $M/L$  independientemente del valor individual que tome cada uno.

De otro lado, al analizar la gráfica 10(b) (columna derecha) respecto a la razón  $M/L$ , se puede observar que alcanza valores observacionales aproximadamente en los intervalos:



3-3.6 Gyr, 4-5Gyr y los puntos 6.5 Gyr, 8 Gyr y 9 Gyr.

El radio de brillo medio fluctúa a partir de los 2 Gyr a lo largo de la evolución del satélite y sólo alcanza en ciertos puntos los valores observacionales, por ejemplo, en 1.5-2.5 Gyr, 3.5 Gyr, 6.5 Gyr, 8 y 9 Gyr. Mientras que la dispersión de velocidades casi no cambia, se mantiene por debajo de la línea observacional y sólo alcanza valores observacionales aproximadamente en cuatro puntos: en 6, 7, 8 y 9 Gyr.

Con respecto a los radios de lagrange, se puede apreciar que durante los primeros 5 Gyr la galaxia se fragmenta en casi un 50 % y luego casi completamente en el tiempo restante.

En la tabla 11, se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo.

	(3-3.6 )Gyr	(4-5) Gyr	6.5 Gyr	8 Gyr	9 Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	si	—	si	si	si
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	—	—	si	si
$R_{gc}(kpc)$	si	si	—	—	—

Tabla 11: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.3$  kpc y una masa de  $1 \times 10^6 M_{\odot}$

Al observar la gráfica 11, podemos notar que el radio medio coincide en la mayoría de intervalos observacionales de Carina, mientras la dispersión de velocidades sólo en los tres últimos intervalos. Por otro lado, el brillo superficial central no coincide en ningún intervalo de tiempo, a su vez la distancia galactocéntrica sólo coincide con los parámetros observacionales de Carina en los dos primeros intervalos de tiempo. Revisando el primer intervalo (3-3.6) Gyr sólo coinciden con  $M/L$  las variables  $r_{1/2}$  y  $R_{gc}$ , para el segundo intervalo (4-5) Gyr sólo la variable  $R_{gc}$ ; para el punto 6.5 Gyr sólo coincide  $r_{1/2}$ , y los puntos 8 Gyr y 9Gyr coinciden  $r_{1/2}$  y  $\sigma_0$ . De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar que este satélite con estas variables no puede ser un progenitor de Carina

Al comparar las gráficas de la figura 10 tanto para  $R_p = 0.2$  kpc y  $R_p = 0.3$  kpc, y la tablas (10, 11), los comportamientos son similares en la mayoría de variables a excepción la dispersión de velocidades de la gráfica 10 (b) alcanza valores observacionales a los 6, 8y 9 Gyr .

En conclusión, estos satélites no podría ser los posibles progenitores de la galaxia enana de Carina, ya que de todas las características del progenitor, sólo algunas de ellas corresponden a los valores observados para la galaxia Carina y no todos en el mismo intervalo de tiempo.

Satélite con masa inicial de  $1 \times 10^6 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.4 y 0.8 kpc:

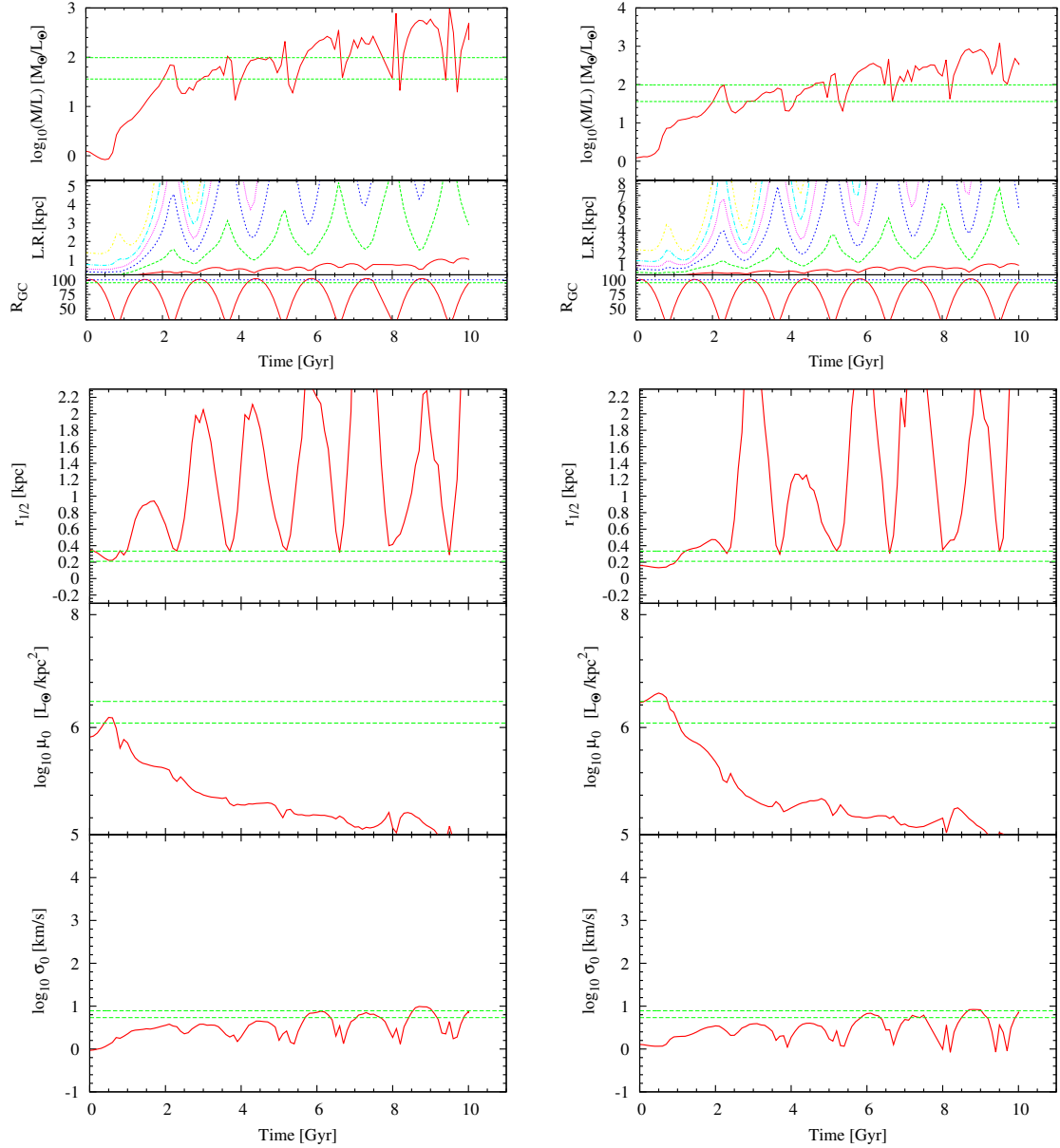


Figura 11: Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^6 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.4 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.8 kpc (gráficas columna de la derecha).

Se puede observar en la gráfica de la figura 11 (a), la razón  $M/L$  aumenta durante los primeros 2 Gyr, luego empieza a fluctuar, se alcanzan valores observacionales en diferentes intervalos de tiempo: 2-2.5 Gyr, 3-3.7 Gyr, 4-5 Gyr, 6.5 Gyr, y los puntos 8 Gyr y 9.5 Gyr.

Por otro lado, en cuanto al brillo superficial central decae en el primer Gyr y sólo alcanza el valor observacional en ese lapso de tiempo; de manera similar para el radio medio, aumenta sus valores y empieza fluctuar en el tiempo restante. La dispersión de velocidades casi permanece constante por debajo de la línea observacional, toma valores observacionales a partir de los 6 Gyr.

Revisando la gráfica de los radios de Lagrange se puede ver que el satélite pierde el 50 % de su masa durante la interacción con la Vía Láctea.

En la tabla 12, se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo (11a). Para el intervalo I de 2-2.5 Gyr ninguna variable corresponde a los valores observacionales, En el intervalo II y III sólo coincide la variable  $R_{gc}$ ; en el intervalo III, es decir 6.5 Gyr coinciden dos variables con los valores observacionales de Carina son  $r_{1/2}$  y  $\sigma_0$ . En el último intervalo sólo coincide  $r_{1/2}$ .

	(2-2.5 )Gyr	(3-3.7) Gyr	(4-5) Gyr	6.5 Gyr	8 Gyr	9.5 Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	—	—	—	si	—	si
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	—	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	—	—	si	—	—
$R_{gc}(kpc)$	—	si	si	—	—	—

Tabla 12: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.4$  kpc y una masa de  $1 \times 10^6 M_{\odot}$

Se puede apreciar el brillo superficial central decae muy rápidamente al igual que la misma gráfica (11a columna izquierda), tomando un valor observacional en el primer Gyr. Esto ocasiona que el radio de brillo medio aumente y fluctúe. Al revisar la dispersión de velocidades alcanza valores observacionales a partir de los 6 Gyr aproximadamente; por último, la gráfica de los radios de Lagrange muestra una mayor parte del satélite que sobrevive a la interacción con la Vía Láctea, esto se evidencia en la línea azul clara que representa el 50 % del satélite se mantiene hasta los 6 Gyr.

Para la gráfica de la figura 11(b) (columna derecha), la razón  $M/L$  tiende a aumentar, fluctuando durante el tiempo restante; alcanza valores observacionales en los siguientes intervalos 2-2.5 Gyr, 3-3.7 Gyr, 4.2-4.7 Gyr, 6.7 Gyr y 8.2 Gyr aproximadamente. Las variables ( $r_{1/2}$ ,  $\mu_0$ ,  $\sigma_0$ , y  $R_{gc}$ ) tienen un comportamiento similar a las de la figura 11a.

En la tabla 13 se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo.

	(2-2.5 )Gyr	(3-3.7) Gyr	(4.2-4.7) Gyr	6.7 Gyr	8.2 Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	—	—	—	si	—
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	—	—	—	—
$R_{gc}(kpc)$	—	si	si	—	—

Tabla 13: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.8$  kpc y una masa de  $1 \times 10^6 M_{\odot}$

Se puede apreciar en la tabla 13, que en el I y V intervalo ninguna variable coincidió con los valores observacionales de Carina, en los intervalos II y III sólo corresponde  $R_{gc}$ , para el penúltimo punto (6.7 Gyr) sólo se llegó a valores observacionales con  $r_{1/2}$ .

Muchos intervalos donde se tienen valores observacionales, pero todos ellos no coinciden con los valores observacionales de Carina, por eso se les escribe el intervalo de tiempo pero no la letra (si). Las variables que contengan un (si) coinciden con los valores observacionales. Revisando el intervalo II y III coincide sólo la variable  $R_{gc}$ , para el intervalo IV (6.7 Gyr) sólo coincide la variable  $r_{1/2}$ .

Podemos concluir que las variaciones en los radios de Plummer no tuvieron los resultados esperados, se trabajó con una masa de  $10^6 M_{\odot}$  y las características buscadas para el progenitor de Carina no coincidieron en el mismo intervalo para  $M/L$ . Para encontrar las características del progenitor de Carina se varía la masa a  $10^7 M_{\odot}$  y se realiza el mismo análisis variando los radios de Plummer para buscar el mejor progenitor de Carina.

### 4.3.2. Satélites con masa $10^7 M_\odot$

Satélite con masa inicial de  $1 \times 10^7 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.2 y 0.3 kpc:

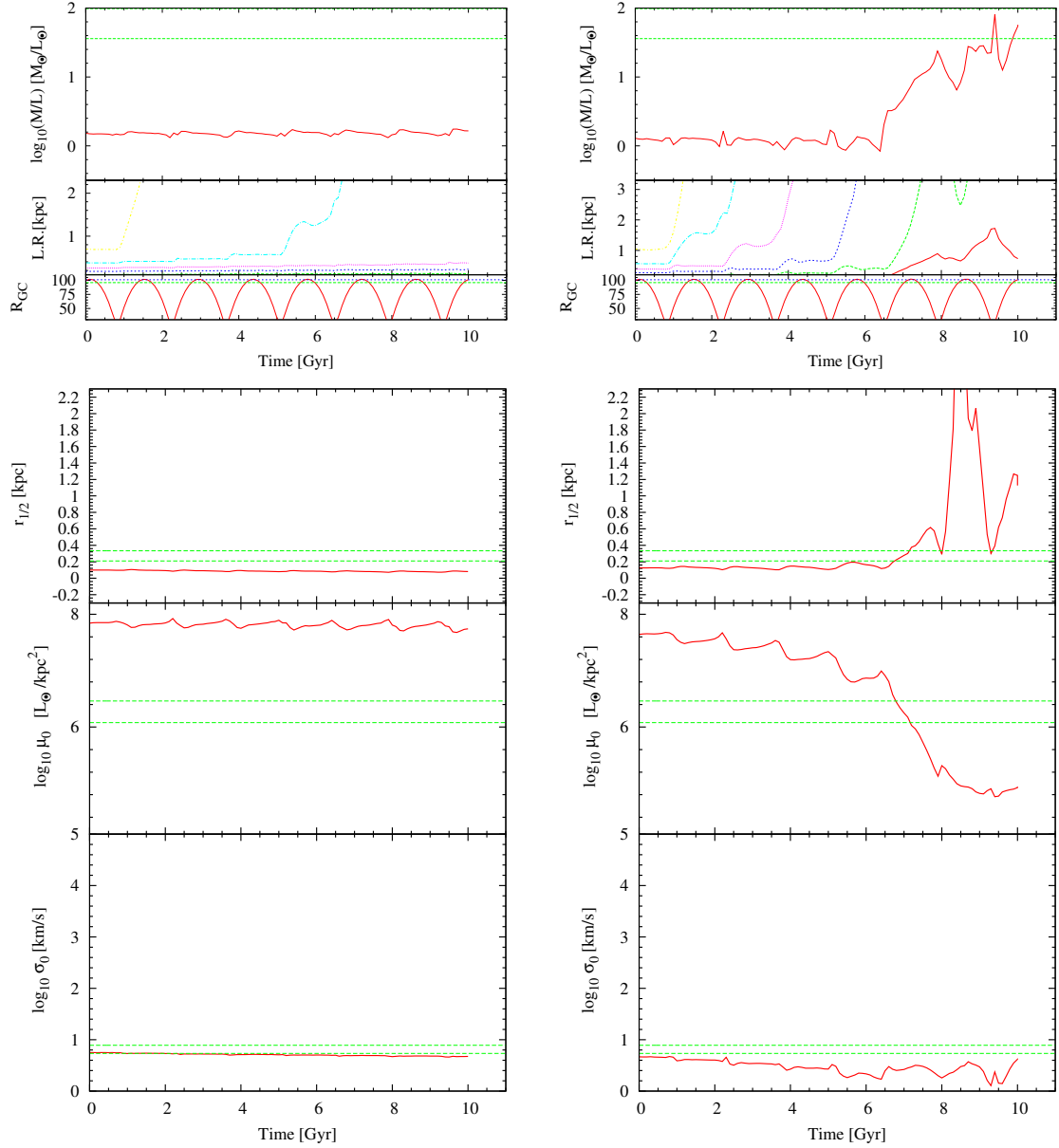


Figura 12: Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^7 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.2 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.3 kpc (gráficas columna de la derecha).

Se puede apreciar en las gráficas de la figura 12 (a), que ninguna de las variables estudiadas cambian, ni tampoco alcanzan los valores observacionales. Se observa en los radios de Lagrange que el 70 % de la masa sobrevive hasta los 6 Gyr aproximadamente, esto nos indica que el satélite es muy denso y no se pierde la masa inicial tan rápido cuando interactúa con el potencial gravitacional de la Vía Láctea.

Por lo tanto, este satélite con estas características no sería un buen progenitor de Carina, ya que no coinciden sus variables con  $M/L$  en ningún tiempo.

Por otro lado, al revisar las gráficas 12 (b), la relación  $M/L$  permanece casi constante hasta los 6.5 Gyr y luego se incrementa, esta variable toma un sólo valor observacional en 9.5 Gyr. Para el radio de brillo medio ( $r_{1/2}$ ) se mantiene constante hasta 7 Gyr y luego aumenta, toma valores observacionales en 7 Gyr, 8 Gyr y 9.5 Gyr aproximadamente. Otra característica relacionada con  $M/L$  es el brillo superficial central ( $\mu_0$ ), esta variable decae a medida que transcurre el tiempo y alcanza un valor observacional (6.5-7) Gyr.

Si nos referimos a la dispersión de velocidades sobre la visual ( $\sigma_0$ ), podemos observar que no alcanza en ningún tiempo los valores registrados. En cuanto a los radios de Lagrange, el satélite mantiene el 10 % de su masa inicial hasta los 9 Gyr aproximadamente.

En conclusión estos satélites con radios de Plummer  $R_p = 0.2$  kpc y  $R_p = 0.3$  kpc y una masa de  $10^7 M_\odot$  no son apropiados para ser progenitores de la galaxia enana de Carina.

**Satélite con masa inicial de  $1 \times 10^7 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.4 y 0.5 kpc:**

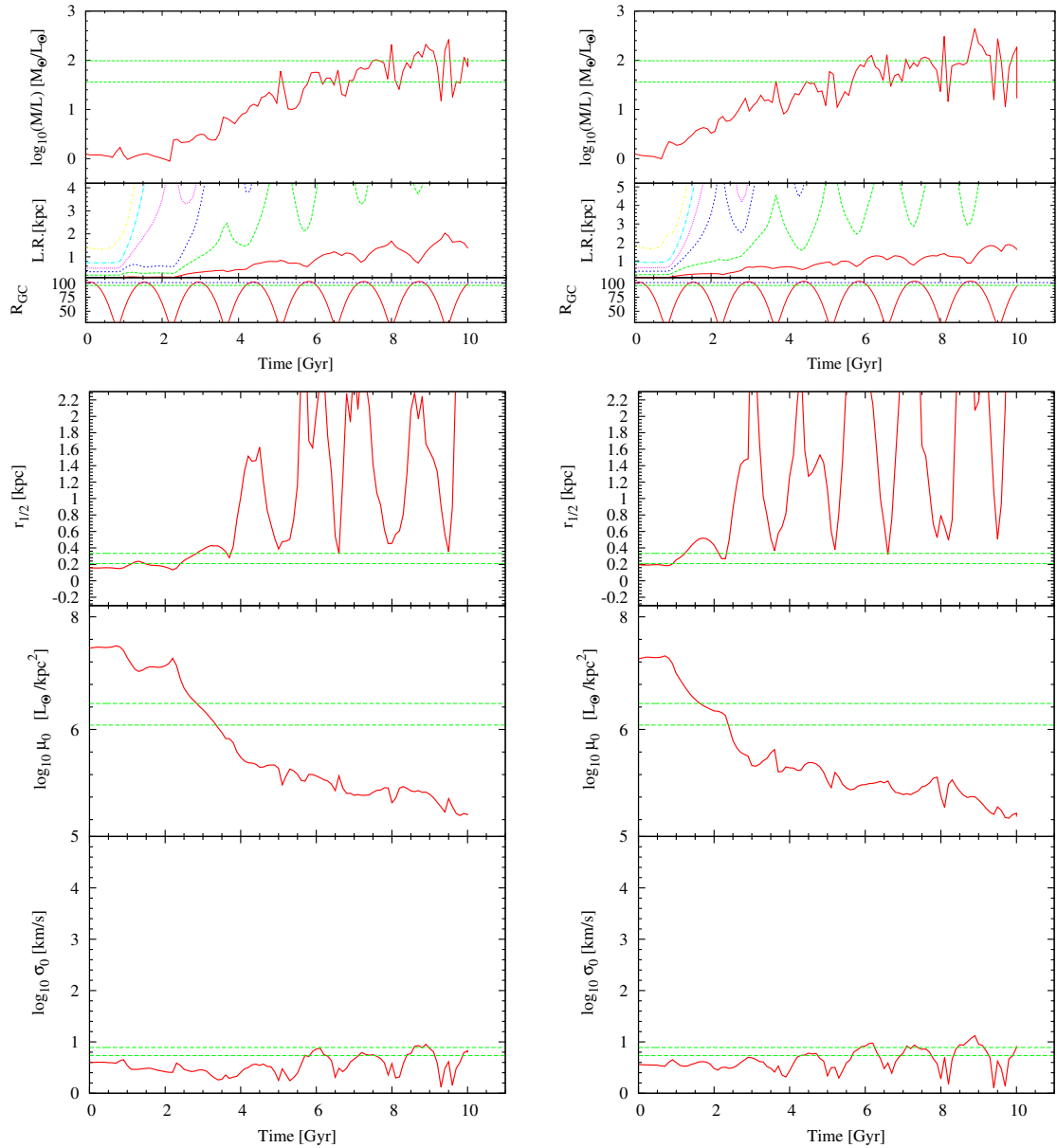


Figura 13: Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^7 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.4 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.5 kpc (gráficas columna de la derecha).

Se puede observar en las gráficas de la figura 13 que el comportamiento en la mayoría de sus variables tanto para radio de Plummer 0.4 kpc y 0.5 kpc es muy similar. Revisando la gráfica superior la razón  $M/L$  aumenta paulatinamente tomando un valor observacional a los 5 Gyr, 6-6.5 Gyr, 7-8 Gyr, 8.5 Gyr, 9.5 Gyr aproximadamente.

Por otro lado, el comportamiento de la gráfica de radio de brillo medio  $r_{1/2}$  se mantiene casi constante en los primeros 4 Gyr y luego fluctúa a partir de allí, alcanza valores observacionales en los siguientes intervalos de tiempo: 1-1.5 Gyr, 2.5-3 Gyr. El brillo superficial central  $\mu_0$  disminuye durante la evolución del satélite, toma un único intervalo observacional 3-3.5 Gyr. Por último, la dispersión de velocidades sobre la visual  $\sigma_0$  se mantiene casi constante por debajo de la línea observacional hasta los 6 Gyr aproximadamente, donde

tomar valores observacionales en los intervalos de 7-8 Gyr y 8.5 Gyr.

En cuanto a los radios de Lagrange se puede afirmar que el 30 % de la masa del satélite se mantiene hasta 4.5 Gyr aproximadamente.

En la tabla 14, se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo.

	5 Gyr	(6-6.5) Gyr	(7-8) Gyr	8.5 Gyr	9.5 Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	—	—	—	—	—
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	si	si	si	—
$R_{gc}(kpc)$	—	si	si	si	—

Tabla 14: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.4$  kpc y una masa de  $1 \times 10^7 M_{\odot}$

Se puede observar en la tabla 14, el primer intervalo de tiempo a los 5 Gyr, que ninguna de las variables del satélite toma valores observacionales para la galaxia Carina, revisando los intervalos II, III y IV las variables  $\sigma_0$  y  $R_{gc}$  coinciden con los valores observacionales, mientras en el último intervalo ninguna de las variables toma los valores observacionales. Coinciden algunas características, pero no la mayoría, por lo cual no es un buen progenitor de la galaxia Carina.

Por otro lado, al revisar las gráficas 13(b), se aprecia que la razón masa-luminosidad se comporta de forma similar a la gráfica 13 (a). Empezamos diciendo que esta característica aumenta paulatinamente hasta los 6 Gyr donde se trata de estabilizar, aunque fluctúe todo el tiempo, alcanza valores observacionales en los siguientes puntos: 3.6 Gyr, 4.5 Gyr, 5 Gyr, 6-8 Gyr, 8.5 Gyr, 9.5 Gyr.

En la tabla 15, se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo.

	3.6 Gyr	4.5 Gyr	5 Gyr	(6-8) Gyr	8.5 Gyr	9.5 Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	—	—	—	—	—	—
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	—	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	si	—	si	si	—
$R_{gc}(kpc)$	—	si	—	si	—	—

Tabla 15: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.5$  kpc y una masa de  $1 \times 10^7 M_{\odot}$

Al revisar la tabla 15, para los intervalos I (3.6 Gyr), III (5 Gyr) y VI (9.5 Gyr) ninguna de las variables estudiadas coincide con los valores observacionales de Carina; sin embargo  $r_{1/2}$  y  $\mu_0$  toman valores observacionales en otros intervalos de tiempo diferentes. Revisando el intervalo II (4.5 Gyr) y IV (6-8 Gyr) las variables  $\sigma_0$  y  $R_{gc}$  toman valores



observacionales. En conclusión estos satélites con radios de Plummer  $R_p = 0.4$  kpc y  $R_p = 0.5$  kpc y una masa de  $10^7 M_\odot$  no son apropiados para ser progenitores de la galaxia enana de Carina.

**Satélite con masa inicial de  $1 \times 10^7 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.6 y 0.7 kpc:**

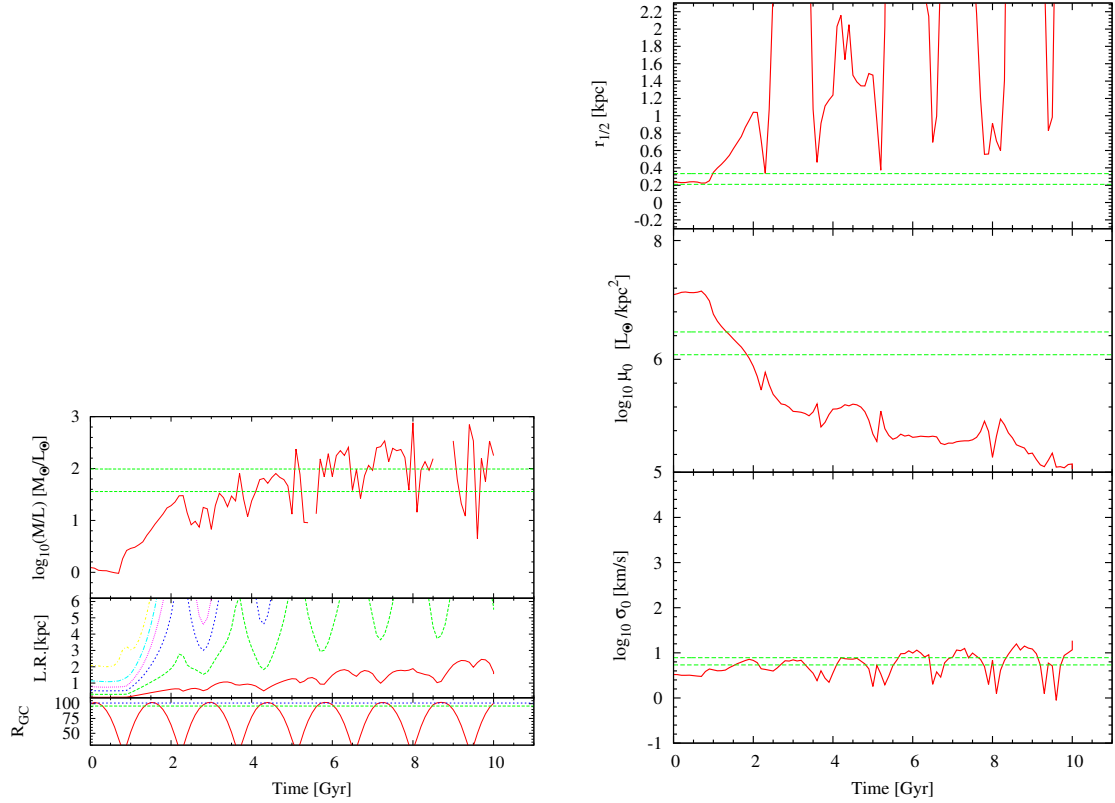


Figura 14: Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^7 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.6 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.7 kpc (gráficas columna de la derecha).

En la figura 14 (a), se puede observar en la relación  $M/L$  que empieza a aumentar a partir del primer Gyr y luego fluctúa durante el tiempo restante; alcanza valores observacionales en los siguientes intervalos: 3.7 Gyr, 4.2-5 Gyr, 5.2 Gyr, 5.7-6.5 Gyr, 8-8.5 Gyr, 9-9.5 Gyr aproximadamente.

El comportamiento de este satélite es bastante heterogéneo en sus características. Al revisar el radio de brillo medio aumenta durante el primer Gyr y luego fluctúa rápidamente, escasamente alcanza un sólo valor observacional en el intervalo de tiempo (2-2.5)Gyr. Al observar el comportamiento de la dispersión de velocidades cambia a lo largo de la línea observacional (la verde), tomando muchos valores dentro del rango observacional, como por ejemplo a los 2 Gyr, (2.7-3.5) Gyr, (4.2-5) Gyr, (5.7-6.5) Gyr, (8-8.5) Gyr y (9-9.5) Gyr. El radio superficial de brillo disminuye a lo largo de la evolución del satélite, toma valores observacionales en el rango de (1.5 a 2) Gyr aproximadamente.

En cuanto a la variable de los radios Lagrange el satélite pierde el 50 % de su masa en los primeros 3 Gyr como se puede ver en la línea de color magenta.

Por otra parte, revisando las gráficas (a) poseen un comportamiento similar a las mismas en (b), inclusive en los mismos intervalos aproximadamente.

En la tabla 16, se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo.

	3.7 Gyr	(4.2-5) Gyr	5.2 Gyr	(5.7-6.5) Gyr	(8-8.5) Gyr	(9-9.5) Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	—	—	—	—	—	—
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	—	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	si	si	si	si	si
$R_{gc}(kpc)$	—	si	—	si	si	si

Tabla 16: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.6$  kpc y una masa de  $1 \times 10^7 M_{\odot}$

Observando la tabla 16 revisando el primer intervalo (3.7 Gyr) la mayoría de las variables del satélite no coincide con los valores observacionales de Carina, para el intervalo II coinciden  $R_{gc}$  y  $\sigma_0$ , para el III esta última. Teniendo en cuenta el intervalo IV, podemos observar que las variables  $r_{1/2}$  y  $\mu_0$  no ajustan con los valores observacionales. En los dos últimos intervalos coinciden  $R_{gc}$  y  $\sigma_0$ .

En conclusión estos satélites con radios de Plummer  $R_p = 0.6$  kpc y  $R_p = 0.7$  kpc y una masa de  $10^7 M_{\odot}$  no son apropiados para ser progenitores de la galaxia enana de Carina.

### 4.3.3. Satélites con masa $10^8 M_\odot$

Satélite con masa inicial de  $1 \times 10^8 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.4 y 0.5 kpc:

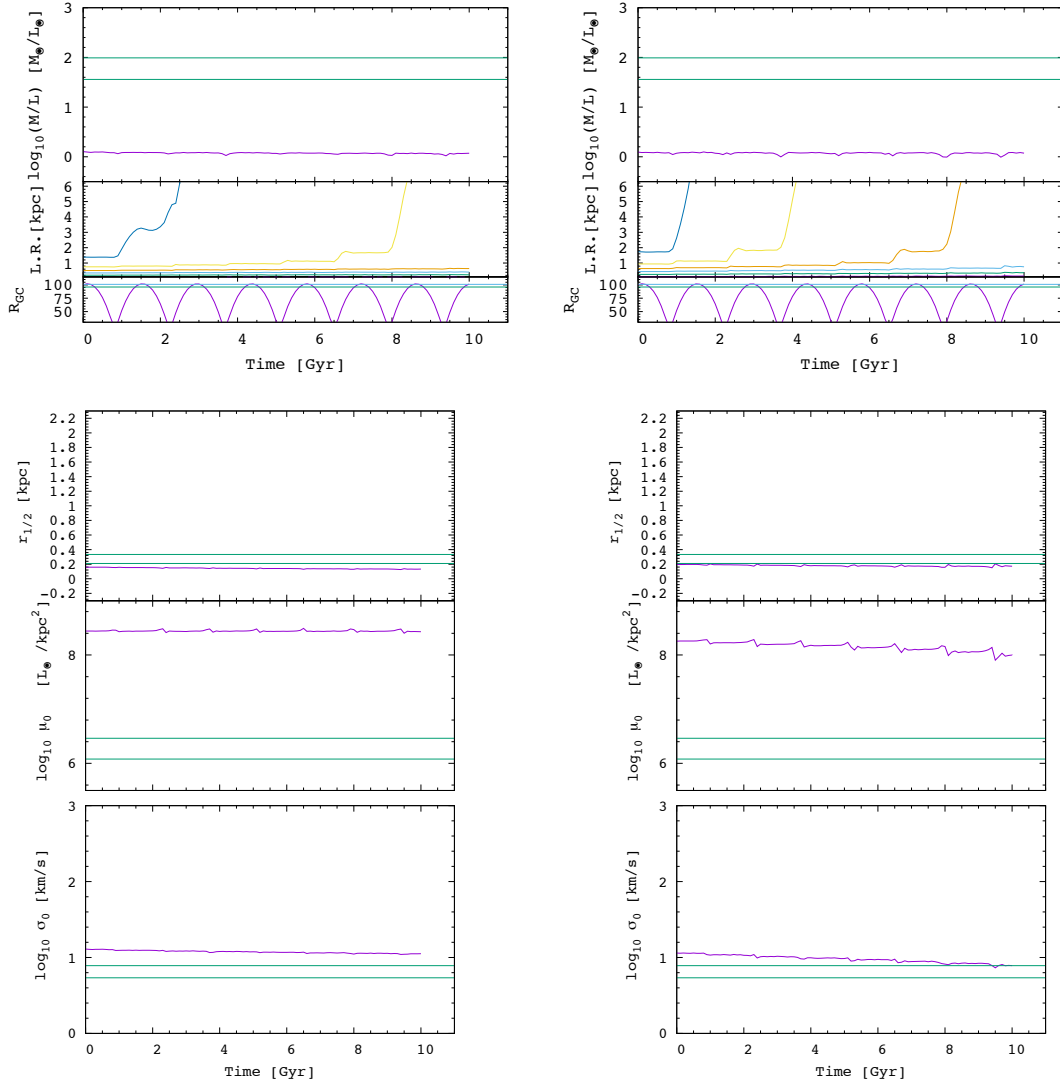


Figura 15: Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^8 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.4 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.5 kpc (gráficas columna de la derecha).

Se puede apreciar en la fig 15, las variables de estudio  $M/L$ ,  $\mu_0$ ,  $r_{1/2}$ ,  $\sigma_0$  se mantienen casi constantes a través de la evolución temporal del satélite, sin embargo  $M/L$ ,  $\mu_0$  siempre están por debajo de las líneas observacionales, por lo cual estas no alcanzan ningún valor observacional de Carina. Para las variables  $r_{1/2}$  y  $\sigma_0$  alcanza entrar en el rango de los valores observacionales de Carina casi todo el tiempo para la primera y a partir de los 7 Gyr en  $\sigma_0$  (b). Si observamos la gráfica de los radios de Lagrange podemos ver que para el radio de Plummer de 0.4 kpc el 70% de su masa inicial se mantiene hasta los 8 Gyr, mientras para el radio de Plummer de 0.5 kpc lo hace hasta los 4 Gyr. De acuerdo a lo anterior estos satélites no podrían ser los progenitores de la galaxia enana de Carina.

**Satélite con masa inicial de  $1 \times 10^8 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.6 y 0.7 kpc:**

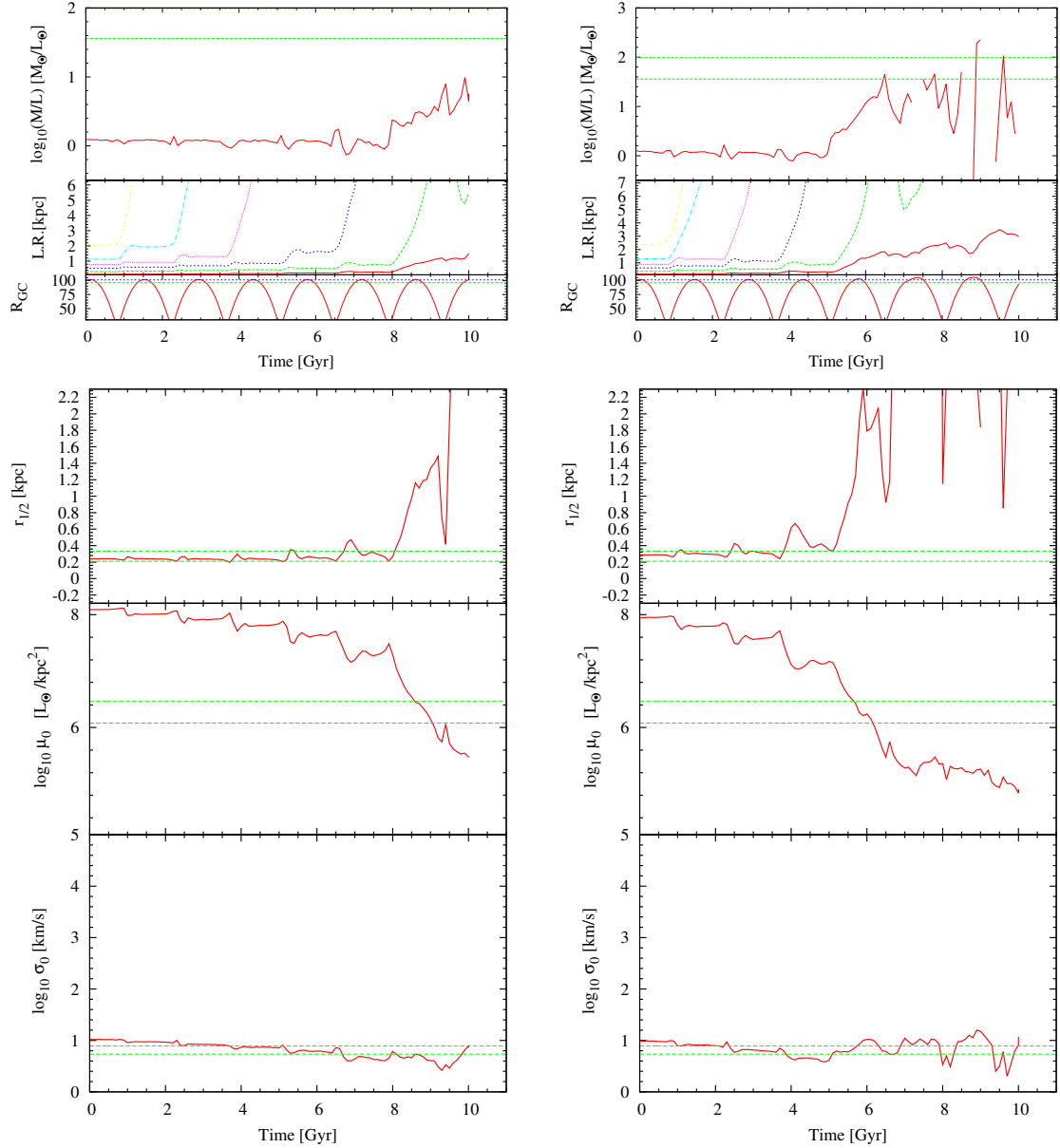


Figura 16: Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^8 M_\odot$ . (a) con radio de Plummer de 0.6 kpc (gráficas columna de la izquierda), (b) con radio de Plummer de 0.7 kpc (gráficas columna de la derecha).

En la gráfica de la figura 16, se puede observar que la razón masa luminosidad permanece casi constante durante un período de 8 Gyr aproximadamente y luego se incrementa hasta en el período restante de la interacción llegando a un valor cercano a los  $10 M/L_\odot$ , y no alcanza en ningún momento los valores observacionales. La estabilidad del satélite permanece durante 6 Gyr aproximadamente en la cual la dispersión de velocidades, y el radio de brillo medio permanecen casi constantes hasta que varían, uno disminuye y el otro aumenta respectivamente. El brillo superficial central disminuye y cae dentro los parámetros observacionales hasta los 9 Gyr, mientras la dispersión de velocidades alcanza valores observacionales hasta el intervalo 2.5-6.5 Gyr y a los 8 Gyr.

Por otro lado, al ver el comportamiento de la gráfica de los radios de Lagrange el satélite mantiene el 50 % de su masa inicial en los primeros 4 Gyr en comparación de la gráfica (b) que lo hace hasta los 2 Gyr.

Al revisar la gráfica de la relación  $M/L$  (b), nos damos cuenta que se mantiene casi constante durante 5 Gyr y luego aumenta levemente tomando valores observacionales entre 6.5 Gyr, 7.5-8 Gyr, 8.5-9 Gyr y 9.5-10 Gyr aproximadamente. El brillo superficial decae un poco más rápidamente que la misma gráfica (a), alcanzando un valor observacional a los 6 Gyr. La dispersión de velocidades no cambia mucho durante todo el tiempo de la simulación, alcanzando el rango esperado en 6.5 Gyr, 7.5-8 Gyr y 9.5-10 Gyr. En cuanto al radio de brillo medio permanecen casi constantes hasta los 5 Gyr aproximadamente, luego se incrementa fluctuando en el tiempo restante de la evolución del satélite.

En la tabla 18 (b), se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo.

	6.5 Gyr	(7.5-8) Gyr	(8.5-9) Gyr	(9.5-10) Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	—	—	—	—
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	si	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	si	si	—	si
$R_{gc}(kpc)$	—	si	si	—

Tabla 17: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.7$  kpc y una masa de  $1 \times 10^8 M_{\odot}$

Al observar la tabla 18, el primer intervalo (6.5 Gyr) las variables que toman valores observacionales son  $\mu_0$  y  $\sigma_0$ , para el intervalo II las cantidades que alcanzan los valores observacionales son:  $\sigma_0$ ,  $R_{gc}$ , en el intervalo III sólo  $R_{gc}$  y en último intervalo  $\sigma_0$ .

Se puede concluir que para el satélite con radio de Plummer 0.6 kpc y satélite con radio de Plummer 0.7 kpc, ninguno de los dos satélites se comporta como un buen candidato a progenitor de Carina.

**Satélite con masa inicial de  $1 \times 10^8 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.8 kpc:**

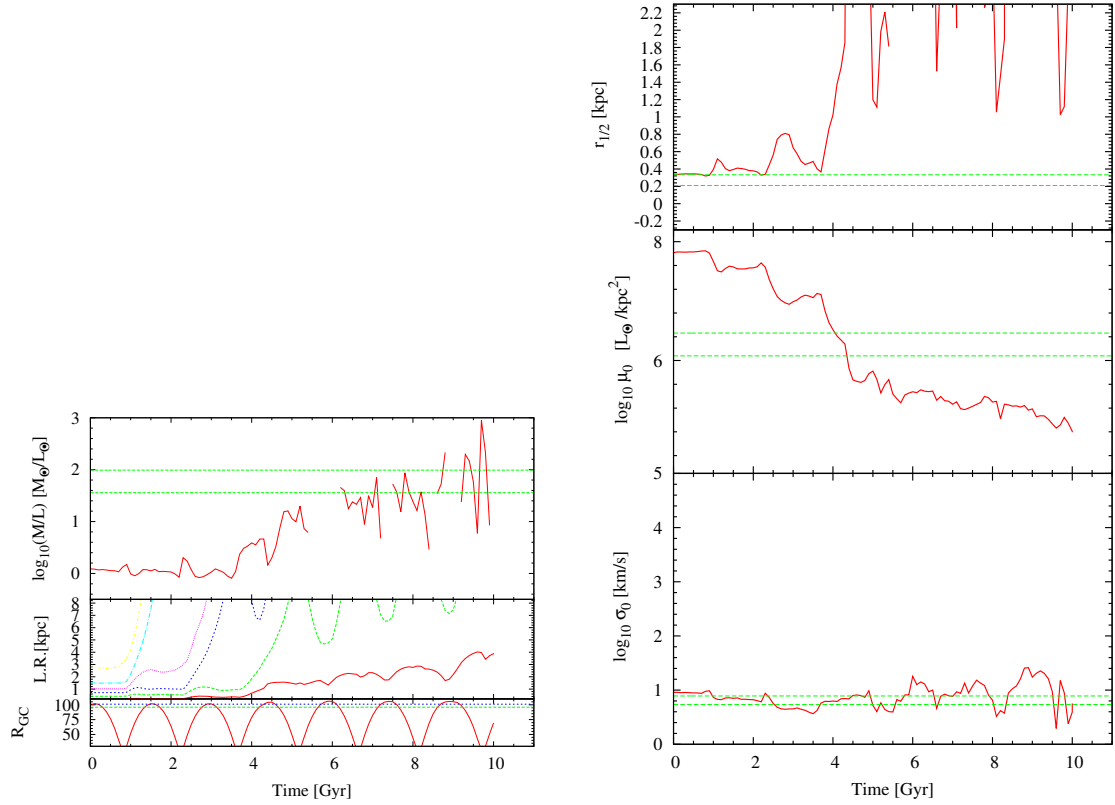


Figura 17: Evolución de las propiedades cinemáticas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^8 M_\odot$  y radio de Plummer de 0.8 kpc.

Se puede observar en la figura 17, que la relación masa-luminosidad se mantiene casi constante hasta los 4 Gyr aproximadamente, a partir del cual aumenta fluctuando durante la evolución en el tiempo. Esta característica toma valores observacionales en los siguientes intervalos de tiempo: 6-6.5 Gyr, 7-7.5 Gyr, 7.7-8 Gyr, 9.2-9.7 Gyr.

El radio de brillo medio cambia hasta los 4 Gyr y a partir de allí fluctúa drásticamente en el tiempo restante, podemos decir que esto ocurre porque el brillo superficial central disminuye hasta el mismo tiempo y alcanza estabilizarse en sus valores, esta cantidad toma el valor observacional en el intervalo de 4-4.5 Gyr aproximadamente.

Por otro lado, la dispersión de velocidades permanece casi constante durante todo el tiempo, tomando los valores observacionales como lo indica la tabla 18. En cuanto a la gráfica de los radios de Lagrange se puede observar que el 50 % de la masa inicial se mantiene hasta los primeros 2.5 Gyr.

En la tabla 18, se registran las variables cinemáticas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo.

Observando la tabla 18, nos damos cuenta que en el primer intervalo (6-6.5 Gyr) las variables  $\sigma_0$  y  $R_{gc}$  alcanzan valores observacionales, en el intervalo II sólo coincide  $R_{gc}$ , ahora para el intervalo III sólo coincide  $\sigma_0$  y el último intervalo las variables que coinciden con los valores observacionales de Carina son  $\sigma_0$  y  $R_{gc}$ ; también se puede ver que el radio de brillo medio ( $r_{1/2}$ ) y la superficie central de brillo ( $\mu_0$ ) no alcanzan ningún valor

	(6-6.5) Gyr	(7-7.5) Gyr	(7.7-8) Gyr	(9.2-9.7) Gyr
$M/L_{\odot}$	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	—	—	—	—
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	si	—	si	si
$R_{gc}(kpc)$	si	si	—	si

Tabla 18: Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con  $R_p = 0.8$  kpc y una masa de  $1 \times 10^8 M_{\odot}$

observacional, es probable que para otros tiempos lo hagan.

En conclusión, las variables que tienen coincidencia con los valores observacionales son pocas, este satélite tampoco es un buen candidato a progenitor de Carina.

#### 4.4. Discusión de resultados

Para una distancia apocéntrica de 100 kpc, se desarrollaron varias simulaciones de satélites con masas de  $10^6$  a  $10^8 M_\odot$  y se variaron los radios de Plummer  $R_p = 0.2$  kpc a  $R_p = 0.8$  kpc. Las simulaciones con una masa inicial de  $10^8 M_\odot$  y radios de Plummer 0.2 y 0.3 kpc, no mostraron evidencia de cambio alguno de sus variables y en ningún momento coincidieron con las cantidades observacionales de Carina, por lo tanto se descartaron como posibles progenitores.

Las tablas 19 y 20 se construyeron a partir de la revisión de los intervalos de tiempo en donde todas las variables evaluadas (la dispersión de velocidades sobre la visual, el radio de brillo medio, el brillo superficial central y la distancia galactocéntrica) coincidían con los valores observacionales de la razón  $M/L$ . De acuerdo a esto en las diferentes simulaciones realizadas no todas las variables coincidían dentro de los mismos valores de intervalos de tiempo. Así se puede afirmar que si la galaxia simulada es un progenitor de Carina, deberían coincidir todas las variables en un mismo intervalo de tiempo con los valores observacionales de la razón  $M/L$ .

En estas tablas se muestra un resumen de los diferentes intervalos de tiempo para las cuales las variables de cada una de las simulaciones se ajustan con los valores observacionales. Es importante notar que cada intervalo es diferente tanto para la masa y radio de Plummer de cada simulación. Se puede observar las propiedades físicas de posibles progenitores de Carina, los valores están ya mencionados en cada simulación e intervalo de tiempo; el símbolo (si), hace referencia a que ese parámetro medido se ajusta a los valores observacionales de la galaxia Carina para ese intervalo de tiempo. Donde no hay valor, no significa que no lo tenga, sino que no se ajusta con estos parámetros en ese mismo tiempo. La palabra (otro) significa que toma un valor observacional, pero no en el mismo intervalo de tiempo de Carina.

Al revisar la tabla 19, nos podemos dar cuenta que las simulaciones para la masa  $10^6 M_\odot$  y el radio de Plummer 0.2 kpc existe dos variables de cinco que reproducen los valores observacionales de Carina en el intervalo II, estas son el radio medio de brillo  $r_{1/2}$  y la distancia galactocéntrica. Para el radio de Plummer 0.3 kpc, se puede ver que hay dos variables como el radio medio de brillo  $r_{1/2}$  y la dispersión de velocidades que reproducen los valores observacionales de Carina en ese mismo intervalo de tiempo. Al revisar el radio de Plummer 0.4 kpc con la misma masa sólo en el intervalo IV (6.5 Gyr), las variables que se ajustan en el mismo intervalo de tiempo son: el radio medio de brillo  $r_{1/2}$  y la dispersión de velocidades  $\sigma_0$ . Para el radio de Plummer 0.8 kpc, en cada uno de los intervalos sólo una variable reproduce los valores observacionales de Carina, se puede afirmar según lo visto en cada uno de los radios, que para esta masa no existen posibles progenitores de la galaxia enana de Carina.

Al observar la masa  $10^7 M_\odot$ , el radio de Plummer de 0.4 kpc hay coincidencia de dos variables de cuatro comparadas con los valores observacionales de Carina, para los intervalos II (6-6.5 Gyr), III (7-8 Gyr) y IV (8.5 Gyr) la dispersión de velocidades  $\sigma_0$  y la distancia galactocéntrica  $R_{gc}$ .

Para el radio de Plummer 0.5 kpc, se alcanza valores observacionales con Carina para las variables  $\sigma_0$  y  $R_{gc}$  en los intervalos II (4.5 Gyr) y IV (6-8 Gyr). Revisando los intervalos III y VI no coinciden la mayoría de variables. Considerando el radio de Plummer 0.6 kpc, existe coincidencia en dos variables de cuatro, estas son: la dispersión de velocidades sobre



Variables	I (Gyr)	II (Gyr)	III (Gyr)	IV (Gyr)	V (Gyr)	VI (Gyr)
$10^6 M_\odot y R_p = 0.2 kpc$						
$M/L_\odot$	5	(6.5-7)	(8-8.5)	(9.5-10)		
$r_{1/2}(kpc)$	otro	si	si	—		
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	otro	—	—	—		
$\sigma_0(km/s)$	—	—	—	—		
$R_{gc}(kpc)$	—	si	—	—		
$10^6 M_\odot y R_p = 0.3 kpc$						
$M/L_\odot$	(3-3.6)	(4-5)	6.5	8	9	
$r_{1/2}(kpc)$	si	—	si	si	si	
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	otro	—	—	—	—	
$\sigma_0(km/s)$	—	—	otro	si	si	
$R_{gc}(kpc)$	si	si	—	—	—	
$10^6 M_\odot y R_p = 0.4 kpc$						
$M/L_\odot$	(2-2.5)	(3-3.7)	(4-5)	6.5	8	9.5
$r_{1/2}(kpc)$	si	—	—	si	—	si
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	otro	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	—	—	si	otro	—
$R_{gc}(kpc)$	—	si	si	—	—	—
$10^6 M_\odot y R_p = 0.8 kpc$						
$M/L_\odot$	(2-2.5)	(3-3.7)	(4.2-4.7)	6.7	8.2	
$r_{1/2}(kpc)$	otro	otro	otro	si	—	
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	otro	—	—	—	—	
$\sigma_0(km/s)$	—	—	—	otro	otro	
$R_{gc}(kpc)$	—	si	si	—	—	
$10^7 M_\odot y R_p = 0.4 kpc$						
$M/L_\odot$	5	(6-6.5)	(7-8)	8.5	9.5	
$r_{1/2}(kpc)$	otro	otro	—	—	—	
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	otro	—	—	—	—	
$\sigma_0(km/s)$	—	si	si	si	—	
$R_{gc}(kpc)$	—	si	si	si	—	
$10^7 M_\odot y R_p = 0.5 kpc$						
$M/L_\odot$	3.6	4.5	5	(6-8)	8.5	9.5
$r_{1/2}(kpc)$	otro	otro	—	—	—	—
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	otro	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	—	si	—	si	si	—
$R_{gc}(kpc)$	—	si	—	si	—	—
$10^7 M_\odot y R_p = 0.6 kpc$						
$M/L_\odot$	3.7	(4.2-5)	5.2	(5.7-6.5)	(8-8.5)	(9-9.5)
$r_{1/2}(kpc)$	otro	otro	—	—	—	—
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	otro	—	—	—	—	—
$\sigma_0(km/s)$	otro	si	si	si	si	si
$R_{gc}(kpc)$	—	si	—	si	si	si

Tabla 19: Resumen de las propiedades cinemáticas que reproducen los valores observacionales de Carina para todos los satélites con diferentes radios de Plummer y masas  $10^6$  y  $10^7 M_\odot$ , en diferentes intervalos para cada simulación.

la visual  $\sigma_0$ , la distancia galactocéntrica  $R_{gc}$ ; en los intervalos II(4.2-5 Gyr), el intervalo IV (5.7-6.5 Gyr), V y VI. Esto nos indica que estos radios y masa aunque tienen valores observacionales de la galaxia Carina, no son buenos candidatos a progenitor de la galaxia enana de Carina.

Variables	I (Gyr)	II (Gyr)	III (Gyr)	IV (Gyr)	V (Gyr)	VI (Gyr)
$10^8 M_\odot y R_p = 0.7 kpc$						
$M/L_\odot$	6.5	(7.5-8)	(8.5-9)	(9.5-10)		
$r_{1/2}(kpc)$	otro	–	–	–		
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	si	–	–	–		
$\sigma_0(km/s)$	si	si	–	si		
$R_{gc}(kpc)$	–	si	si	–		
$10^8 M_\odot y R_p = 0.8 kpc$						
$M/L_\odot$	(6-6.5)	(7-7.5)	(7-7.8)	(9.2-9.7)		
$r_{1/2}(kpc)$	otro	–	–	–		
$\mu_0 (L_\odot/kpc^2)$	otro	–	–	–		
$\sigma_0(km/s)$	si	–	si	si		
$R_{gc}(kpc)$	si	si	–	si		

Tabla 20: Resumen de las propiedades cinemáticas que reproducen los valores observacionales de Carina para todos los satélites con diferentes radios de Plummer y masa  $10^8 M_\odot$ , en diferentes intervalos para cada simulación.

Al observar la tabla 20, satélites con masa de  $10^8 M_\odot$ , el radio de Plummer 0.7 kpc sólo dos variables de cuatro del satélite corresponden a los valores observacionales de la galaxia Carina, el brillo superficial central  $\mu_0$  y la dispersión de velocidades se ajustan en el primer intervalo. Para el radio de Plummer de 0.8 kpc, las variables que coinciden para el intervalo I y IV son la distancia galactocéntrica  $R_{gc}$  y la dispersión de velocidades  $\sigma_0$ . Por lo que después de comparar estos radios de Plummer, se puede afirmar que para esta masa no es posible obtener un progenitor de la galaxia enana de Carina.

Finalmente, se ha encontrado que la órbita que siguen los satélites, permite la existencia de los mismos, cuando tenemos una distancia apocéntrica de 100 kpc y una excentricidad de  $e = 0.68$ , conseguidas en este estudio. Se ha predicho en otros trabajos (Godwin et al. 1985) que las condiciones para los posibles parámetros de Carina, deben ajustarse considerando las interacciones de marea y una órbita que puede tener un valor entre 0.3 y 0.7 para su excentricidad.

En este trabajo se destaca que las interacciones que se dan a través de las simulaciones numéricas, sólo intervienen la Vía Láctea y el satélite, en otros trabajos hechos en los años 2003 [26] y 2009 [19] incluyen cúmulos de dSph con modelos CDM para la revisión de la formación estelar y luminínica de estas galaxias. La masa mínima utilizada en otros estudios es de  $10^7 M_\odot$  incluyendo las interacciones de marea y mecanismos para la formación de grandes galaxias, el trabajo hecho por (M. Irwin. et al 1995 [20]), revela que el presente estudio no está tan lejos de estas predicciones, ya que los satélites que coincidieron con los valores observacionales de la razón  $M/L$  tienen masa de  $10^7 M_\odot$ . La relevancia principal de este trabajo radica en que se intentó desarrollar el progenitor de Carina sin materia oscura como los trabajos hechos en 1997 [30] y 2012 [12]. En la mayoría de trabajos hechos de estas galaxias dSph se involucra la materia oscura para reproducir el mapa

de parámetros orbitales, morfológicos y cinemáticos como 1994 [18], 2013, [34]) entre otros.

Un posible prospecto de este trabajo, es simular estos mismos parámetros conseguidos en estas simulaciones, pero considerando la materia oscura para el progenitor de Carina, ya que es relevante en otros trabajos hechos para la formación de galaxias dSph y ultrafaint.

## Conclusiones

De acuerdo a las revisiones bibliográficas realizadas, se buscó una galaxia satélite de la Vía Láctea que contara con datos observacionales como: la distancia galactocéntrica, excentricidad, radio de brillo medio y tiempo de acreción entre otras características, la que se escogió para el estudio fué la galaxia enana Carina debido a la gran disposición de datos. El criterio principal para la comparación de las variables del satélite simulado y la galaxia enana Carina, fué revisar en qué intervalos de tiempo  $M/L$  toma los valores observacionales, ya que la razón  $M/L$  depende de: la dispersión de velocidades sobre la visual  $\sigma_0$ , el brillo superficial central  $\mu_0$  y el radio medio de brillo  $r_{1/2}$ .

En total se realizaron catorce (14) simulaciones newtonianas de N-cuerpos, para la distancia apocéntrica de 100 kpc, con el fin de buscar los posibles progenitores sin materia oscura de la galaxia de estudio (Carina). Cuatro simulaciones correspondieron a una masa inicial de  $1 \times 10^6 M_\odot$  y un rango de radio de Plummer entre 0.2-0.8 kpc; cinco correspondieron a una masa inicial de  $1 \times 10^7 M_\odot$  y cuyo radio de Plummer fue modificado para cada una entre 0.2-0.6 kpc; cinco correspondieron a una masa inicial de  $1 \times 10^8 M_\odot$  y cuyo radio de Plummer fue modificado para cada una entre 0.4-0.8 kpc.

De acuerdo con el análisis de las simulaciones realizadas, no fue posible reproducir completamente las propiedades cinemáticas de la galaxia enana esferoidal Carina, y por consiguiente no se pudo determinar un posible progenitor para la misma; sin embargo, para la masa  $1 \times 10^7 M_\odot$  y radio de Plummer 0.6 kpc dos de las cinco variables  $\sigma_0$  y  $R_{gc}$  estudiadas tomaron valores observacionales de la galaxia Carina (en el intervalo de tiempo II (4.2-5 Gyr), IV (5.7-6.5 Gyr), V (8-8.5 Gyr) y VI (9-9.5 Gyr) y aunque no todas las variables coincidieron con los valores observacionales, se puede afirmar que esta masa puede ser la base para posteriores trabajos.

## Bibliografía

- [1] M. Aaronson. Accurate radial velocities for carbon stars in Draco and Ursa Minor - The first hint of a dwarf spheroidal mass-to-light ratio. *apjl*, 266:L11–L15, March 1983. doi: 10.1086/183969.
- [2] J. K. Adelman-McCarthy and Agüeros. The Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *apjs*, 172:634–644, October 2007. doi: 10.1086/518864.
- [3] G. W. Angus, A. Diaferio, and P. Kroupa. Using dwarf satellite proper motions to determine their origin. *MNRAS*, 416:1401–1409, September 2011. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19138.x.
- [4] K. Bechtol, A. Drlica-Wagner, E. Balbinot, A. Pieres, J. D. Simon, B. Yanny, B. Santiago, R. H. Wechsler, J. Frieman, A. R. Walker, P. Williams, E. Rozo, E. S. Rykoff, A. Queiroz, E. Luque, A. évý@, D. Tucker, I. Sevilla, R. A. Gruendl, L. N. da Costa, A. Fausti Neto, M. A. G. Maia, T. Abbott, S. Allam, R. Armstrong, A. H. Bauer, G. M. Bernstein, R. A. Bernstein, E. Bertin, D. Brooks, E. Buckley-Geer, D. L. Burke, A. Carnero Rosell, F. J. Castander, R. Covarrubias, C. B. D’Andrea, D. L. DePoy, S. Desai, H. T. Diehl, T. F. Eifler, J. Estrada, A. E. Evrard, E. Fernandez, D. A. Finley, B. Flaugher, E. Gaztanaga, D. Gerdes, L. Girardi, M. Gladders, D. Gruen, G. Gutierrez, J. Hao, K. Honscheid, B. Jain, D. James, S. Kent, R. Kron, K. Kuehn, N. Kuropatkin, O. Lahav, T. S. Li, H. Lin, M. Makler, M. March, J. Marshall, P. Martini, K. W. Merritt, C. Miller, R. Miquel, J. Mohr, E. Neilsen, R. Nichol, B. Nord, R. Ogando, J. Peoples, D. Petravick, A. A. Plazas, A. K. Romer, A. Roodman, M. Sako, E. Sanchez, V. Scarpine, M. Schubnell, R. C. Smith, M. Soares-Santos, F. Sobreira, E. Suchyta, M. E. C. Swanson, G. Tarle, J. Thaler, D. Thomas, W. Wester, J. Zuntz, and DES Collaboration. Eight New Milky Way Companions Discovered in First-year Dark Energy Survey Data. *apj*, 807:50, July 2015. doi: 10.1088/0004-637X/807/1/50.
- [5] T. C. Beers, K. Flynn, and K. Gebhardt. Measures of location and scale for velocities in clusters of galaxies - A robust approach. , 100:32–46, July 1990. doi: 10.1086/115487.
- [6] V. Belokurov et al. Cats and dogs, hair and a hero: A quintet of new milky way companions. *ApJ*, 654(2):897, 2007. URL <http://stacks.iop.org/0004-637X/654/i=2/a=897>.
- [7] J. Binney and S. Tremaine. *Galactic Dynamics*. Princeton series in astrophysics. Princeton University Press, 1987. ISBN 9780691084459. URL <https://books.google.es/books?id=01yNf7mipb0C>.
- [8] G. Bono, P. B. Stetson, A. R. Walker, M. Monelli, M. Fabrizio, A. Pietrinferni, E. Brocato, R. Buonanno, F. Caputo, S. Cassisi, M. Castellani, M. Cignoni, C. E. Corsi, M. Óra@, S. Innocenti@, P. çois@, I. Ferraro, G. Iannicola, M. Nonino, P. G. P. Moroni, L. Pulone, H. A. Smith, and F. Thevenin. On the Stellar Content of the Carina Dwarf Spheroidal Galaxy. *pasp*, 122:651–661, May 2010. doi: 10.1086/653590.
- [9] M. A. Breddels and A. Helmi. Model comparison of the dark matter profiles of Fornax, Sculptor, Carina and Sextans. *A A*, 558:A35, October 2013. doi: 10.1051/0004-6361/201321606.

- [10] T. M. Brown, J. Tumlinson, M. Geha, E. N. Kirby, D. A. VandenBerg, R. R. Muñoz, J. S. Kalirai, J. D. Simon, R. J. Avila, P. Guhathakurta, A. Renzini, and H. C. Ferguson. The Primeval Populations of the Ultra-faint Dwarf Galaxies. *apjl*, 753:L21, July 2012. doi: 10.1088/2041-8205/753/1/L21.
- [11] J. S. Bullock, M. Kaplinghat, A. Fruchter, M. Geha, J. Simon, L. E. Strigari, and B. Willman. Dwarf Galaxies in 2010: Revealing Galaxy Formation’s Threshold and Testing the Nature of Dark Matter. In *astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, volume 2010 of *ArXiv Astrophysics e-prints*, page 32, 2009.
- [12] R. A. Casas, V. Arias, K.ña Ramírez@, and P. Kroupa. Dwarf spheroidal satellites of the Milky Way from dark matter free tidal dwarf galaxy progenitors: maps of orbits. *MNRAS*, page 3289, July 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21319.x.
- [13] E.Ónghia@. Breaking up the Magellanic Group into the Milky Way Halo: Understanding the Local Dwarf Galaxy Properties. *ArXiv e-prints*, February 2008.
- [14] E.Ónghia@, G. Besla, T. J. Cox, and L. Hernquist. Resonant stripping as the origin of dwarf spheroidal galaxies. *nat*, 460:605–607, July 2009. doi: 10.1038/nature08215.
- [15] E.Ónghia@, G. Besla, T. J. Cox, and L. Hernquist. Resonant stripping as the origin of dwarf spheroidal galaxies. *Nature*, 460:605–607, July 2009. doi: 10.1038/nature08215.
- [16] M. Fabrizio, M. Nonino, G. Bono, I. Ferraro, P.çois@, G. Iannicola, M. Monelli, F.évenin@, P. B. Stetson, A. R. Walker, R. Buonanno, F. Caputo, C. E. Corsi, M.Óra@, R. Gilmozzi, C. R. James, T. Merle, L. Pulone, and M. Romaniello. The Carina Project. IV. Radial Velocity Distribution. *PASP*, 123:384–401, April 2011. doi: 10.1086/659743.
- [17] J.-J. Fleck and J. R. Kuhn. Parametric Dwarf Spheroidal Tidal Interaction. *apj*, 592:147–160, July 2003. doi: 10.1086/375585.
- [18] R. A. Flores and J. R. Primack. Observational and theoretical constraints on singular dark matter halos. *apjl*, 427:L1–L4, May 1994. doi: 10.1086/187350.
- [19] E. K. Grebel. Metal-poor galaxies in the local universe. In M. Umemura and K. Omukai, editors, *American Institute of Physics Conference Series*, volume 1480 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 172–183, September 2012. doi: 10.1063/1.4754351.
- [20] M. Irwin and D. Hatzidimitriou. Structural parameters for the Galactic dwarf spheroidals. *mnras*, 277:1354–1378, December 1995. doi: 10.1093/mnras/277.4.1354.
- [21] D. R. H. Johnson and D. R. Soderblom. Calculating galactic space velocities and their uncertainties, with an application to the Ursa Major group. , 93:864–867, April 1987. doi: 10.1086/114370.
- [22] K. V. Johnston, D. N. Spergel, and L. Hernquist. The Disruption of the Sagittarius Dwarf Galaxy. , 451:598, October 1995. doi: 10.1086/176247.
- [23] I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, and D. I. Makarov. A Catalog of Neighboring Galaxies. *aj*, 127:2031–2068, April 2004. doi: 10.1086/382905.
- [24] T. Kaufmann, C. Wheeler, and J. S. Bullock. On the morphologies, gas fractions, and star formation rates of small galaxies. *mnras*, 382:1187–1195, December 2007. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.12436.x.

- [25] R. S. Klessen and P. Kroupa. Dwarf Spheroidal Satellite Galaxies without Dark Matter: Results from Two Different Numerical Techniques. *ApJ*, 498:143–+, May 1998. doi: 10.1086/305540.
- [26] J. Klimentowski, E. L. Lokas, S. Kazantzidis, L. Mayer, and G. A. Mamon. Tidal evolution of discy dwarf galaxies in the Milky Way potential: the formation of dwarf spheroidals. *mnras*, 397:2015–2029, August 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15046.x.
- [27] A. Klypin, A. V. Kravtsov, O. Valenzuela, and F. Prada. Where Are the Missing Galactic Satellites? *ApJ*, 522:82–92, September 1999.
- [28] J. Kormendy, D. B. Fisher, M. E. Cornell, and R. Bender. Structure and Formation of Elliptical and Spheroidal Galaxies. *apjs*, 182:216–309, May 2009. doi: 10.1088/0067-0049/182/1/216.
- [29] P. Kroupa. Dwarf spheroidal satellite galaxies without dark matter. *New Astronomy*, 2:139–164, July 1997. doi: 10.1016/S1384-1076(97)00012-2.
- [30] P. Kroupa, C. Theis, and C. M. Boily. The great disk of Milky-Way satellites and cosmological sub-structures. *aap*, 431:517–521, February 2005. doi: 10.1051/0004-6361:20041122.
- [31] Y.-S. Li, G. De Lucia, and A. Helmi. On the nature of the Milky Way satellites. *mnras*, 401:2036–2052, January 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15803.x.
- [32] E. L. Lokas. The mass and velocity anisotropy of the Carina, Fornax, Sculptor and Sextans dwarf spheroidal galaxies. *MNRAS*, 394:L102–L106, March 2009. doi: 10.1111/j.1745-3933.2009.00620.x.
- [33] E. L. Lokas, S. Kazantzidis, J. Klimentowski, L. Mayer, and S. Callegari. The Stellar Structure and Kinematics of Dwarf Spheroidal Galaxies Formed by Tidal Stirring. *ApJ*, 708:1032–1047, January 2010. doi: 10.1088/0004-637X/708/2/1032.
- [34] A. D. Ludlow, J. F. Navarro, M. Boylan-Kolchin, P. E. Bett, R. E. Angulo, M. Li, S. D. M. White, C. Frenk, and V. Springel. The mass profile and accretion history of cold dark matter haloes. *mnras*, 432:1103–1113, June 2013. doi: 10.1093/mnras/stt526.
- [35] H. Lux, J. I. Read, and G. Lake. Determining orbits for the Milky Way’s dwarfs. *mnras*, 406:2312–2324, August 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16877.x.
- [36] M. Mateo. Main-sequence luminosity and initial mass functions of six Magellanic Cloud star clusters ranging in age from 10 megayears to 2.5 gigayears. *apj*, 331:261–293, August 1988. doi: 10.1086/166552.
- [37] M. L. Mateo. Dwarf Galaxies of the Local Group. *Annu Rev Astron Astrophys*, 36:435–506, 1998. doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.435.
- [38] L. Mayer. Environmental Mechanisms Shaping the Nature of Dwarf Spheroidal Galaxies: The View of Computer Simulations. *Advances in Astronomy*, 2010:278434, 2010. doi: 10.1155/2010/278434.
- [39] A. W. McConnachie. The Observed Properties of Dwarf Galaxies in and around the Local Group. *AJ*, 144:4, July 2012. doi: 10.1088/0004-6256/144/1/4.

- [40] M. Metz, P. Kroupa, and H. Jerjen. Discs of satellites: the new dwarf spheroidals. *MNRAS*, 394:2223–2228, April 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14489.x.
- [41] M. Metz et al. Did the Milky Way Dwarf Satellites Enter The Halo as a Group? *ApJ*, 697:269–274, May 2009. doi: 10.1088/0004-637X/697/1/269.
- [42] Manuel Metz, Pavel Kroupa, and Noam I. Libeskind. The orbital poles of milky way satellite galaxies: A rotationally supported disk of satellites. *The Astrophysical Journal*, 680(1):287, 2008. URL <http://stacks.iop.org/0004-637X/680/i=1/a=287>.
- [43] M. Monelli, L. Pulone, C. E. Corsi, M. Castellani, G. Bono, A. R. Walker, E. Brocato, R. Buonanno, F. Caputo, V. Castellani, M. Óra@, M. Marconi, M. Nonino, V. Ripepi, and H. A. Smith. The Carina Project. II. Stellar Populations. *AJ*, 126:218–236, July 2003. doi: 10.1086/375457.
- [44] B. Moore. Evidence against dissipation-less dark matter from observations of galaxy haloes. *nat*, 370:629–631, August 1994. doi: 10.1038/370629a0.
- [45] B. Moore et al. Dark Matter Substructure within Galactic Halos. *ApJL*, 524:L19–L22, October 1999.
- [46] R. R. Muñoz, S. R. Majewski, and K. V. Johnston. Modeling the Structure and Dynamics of Dwarf Spheroidal Galaxies with Dark Matter and Tides. *apj*, 679:346–372, May 2008. doi: 10.1086/587125.
- [47] R. R. Muñoz, N. Padmanabhan, and M. Geha. Measuring Sizes of Ultra-faint Dwarf Galaxies. *apj*, 745:127, February 2012. doi: 10.1088/0004-637X/745/2/127.
- [48] S. Okamoto, N. Arimoto, Y. Yamada, and M. Onodera. Stellar Populations and Structural Properties of Ultra Faint Dwarf Galaxies, Canes Venatici I, Boötes I, Canes Venatici II, and Leo IV. , 744:96, January 2012. doi: 10.1088/0004-637X/744/2/96.
- [49] T. Okamoto. Galaxy Formation. In A. Frebel, J. R. Maund, J. Shen, and M. H. Siegel, editors, *New Horizons in Astronomy*, volume 393 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 111, August 2008.
- [50] C. Palma, S. R. Majewski, and K. V. Johnston. On the Distribution of Orbital Poles of Milky Way Satellites. *ApJ*, 564:736–761, January 2002.
- [51] S. Pasetto, E. K. Grebel, P. Berczik, C. Chiosi, and R. Spurzem. Orbital evolution of the Carina dwarf galaxy and self-consistent determination of star formation history. *aap*, 525:A99, January 2011. doi: 10.1051/0004-6361/200913415.
- [52] S. Pasetto, E. K. Grebel, P. Berczik, C. Chiosi, and R. Spurzem. Orbital evolution of the Carina dwarf galaxy and self-consistent determination of star formation history. *A A*, 525:A99, January 2011. doi: 10.1051/0004-6361/200913415.
- [53] S. Piatek, C. Pryor, E. W. Olszewski, H. C. Harris, M. Mateo, D. Minniti, and C. G. Tinney. Proper Motions of Dwarf Spheroidal Galaxies from Hubble Space Telescope Imaging. II. Measurement for Carina. *AJ*, 126:2346–2361, November 2003. doi: 10.1086/378713.
- [54] Y. Revaz, P. Jablonka, T. Sawala, V. Hill, B. Letarte, M. Irwin, G. Battaglia, A. Helmi, M. D. Shetrone, E. Tolstoy, and K. A. Venn. The dynamical and chemical evolution of dwarf spheroidal galaxies. *A A*, 501:189–206, July 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200911734.



- [55] D. O. Richstone and S. Tremaine. Measuring mass-to-light ratios of spherical stellar systems by core fitting. , 92:72–74, July 1986. doi: 10.1086/114135.
- [56] M. Rocha, A. H. G. Peter, and J. Bullock. Infall times for Milky Way satellites from their present-day kinematics. *MNRAS*, 425:231–244, September 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21432.x.
- [57] M. Rocha, A. H. G. Peter, J. S. Bullock, M. Kaplinghat, S. Garrison-Kimmel, J. ñorbe@, and L. A. Moustakas. Cosmological simulations with self-interacting dark matter - I. Constant-density cores and substructure. *mnras*, 430:81–104, March 2013. doi: 10.1093/mnras/sts514.
- [58] H. J. Rood, T. L. Page, E. C. Kintner, and I. R. King. The Structure of the Coma Cluster of Galaxies. , 175:627, August 1972. doi: 10.1086/151585.
- [59] E. Shaya, R. Olling, M. Ricotti, S. R. Majewski, R. J. Patterson, R. Allen, R. van der Marel, W. Brown, J. Bullock, A. Burkert, F. Combes, O. Gnedin, C. Grillmair, S. Kulkarni, P. Guhathakurta, A. Helmi, K. Johnston, P. Kroupa, G. Lake, B. Moore, and R. B. Tully. Properties of Dark Matter Revealed by Astrometric Measurements of the Milky Way and Local Galaxies. In *astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, volume 2010 of *Astronomy*, page 274, 2009.
- [60] J. D. Simon and M. Geha. The Kinematics of the Ultra-faint Milky Way Satellites: Solving the Missing Satellite Problem. *apj*, 670:313–331, November 2007. doi: 10.1086/521816.
- [61] Ryan Speller and James E. Taylor. Faint dwarfs in nearby groups. *The Astrophysical Journal*, 788(2):188, 2014. URL <http://stacks.iop.org/0004-637X/788/i=2/a=188>.
- [62] M. Tafelmeyer, P. Jablonka, V. Hill, M. Shetrone, E. Tolstoy, M. J. Irwin, G. Battaglia, A. Helmi, E. Starkenburg, K. A. Venn, T. Abel, P. Francois, A. Kaufer, P. North, F. Primas, and T. Szeifert. Extremely metal-poor stars in classical dwarf spheroidal galaxies: Fornax, Sculptor, and Sextans. *aap*, 524:A58, December 2010. doi: 10.1051/0004-6361/201014733.
- [63] The Dark Energy Survey Collaboration. The Dark Energy Survey. *ArXiv Astrophysics e-prints*, October 2005.
- [64] E. J. Tollerud, J. S. Bullock, L. E. Strigari, and B. Willman. Hundreds of Milky Way Satellites? Luminosity Bias in the Satellite Luminosity Function. *apj*, 688:277–289, November 2008. doi: 10.1086/592102.
- [65] K. A. Venn, M. D. Shetrone, M. J. Irwin, V. Hill, P. Jablonka, E. Tolstoy, B. Lemasle, M. Divell, E. Starkenburg, B. Letarte, C. Baldner, G. Battaglia, A. Helmi, A. Kaufer, and F. Primas. Nucleosynthesis and the Inhomogeneous Chemical Evolution of the Carina Dwarf Galaxy. *apj*, 751:102, June 2012. doi: 10.1088/0004-637X/751/2/102.
- [66] E. Visbal, A. Loeb, and L. Hernquist. A Simple Model for the Density Profiles of Isolated Dark Matter Halos. *ArXiv e-prints*, June 2012.
- [67] M. G. Walker, M. Mateo, and E. W. Olszewski. Systemic Proper Motions of Milky Way Satellites from Stellar Redshifts: The Carina, Fornax, Sculptor, and Sextans Dwarf Spheroidals. *apjl*, 688:L75–L78, December 2008. doi: 10.1086/595586.

- [68] M. G. Walker, M. Mateo, E. W. Olszewski, J. ñarrubia@, N. Wyn Evans, and G. Gilmore. A Universal Mass Profile for Dwarf Spheroidal Galaxies? , 704:1274–1287, October 2009. doi: 10.1088/0004-637X/704/2/1274.
- [69] S. M. Walsh, H. Jerjen, and B. Willman. A Pair of Boötes: A New Milky Way Satellite. *ApJL*, 662:L83–L86, June 2007. doi: 10.1086/519684.
- [70] D. H. Weinberg, J. S. Bullock, F. Governato, R. Kuzio de Naray, and A. H. G. Peter. Cold dark matter: controversies on small scales. *ArXiv e-prints*, June 2013.
- [71] D. R. Weisz, A. E. Dolphin, E. D. Skillman, J. Holtzman, K. M. Gilbert, J. J. Dalcanton, and B. F. Williams. The Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies. I. Hubble Space Telescope/Wide Field Planetary Camera 2 Observations. *apj*, 789:147, July 2014. doi: 10.1088/0004-637X/789/2/147.
- [72] B. Willman et al. A new milky way dwarf galaxy in ursa major. *ApJL*, 626:L85–L88, June 2005. doi: 10.1086/431760.
- [73] J. Wolf and J. S. Bullock. Dark matter concentrations and a search for cores in Milky Way dwarf satellites. *ArXiv e-prints*, March 2012.
- [74] D. B. Zucker et al. A New Milky Way Dwarf Satellite in Canes Venatici. *ApJL*, 643: L103–L106, June 2006. doi: 10.1086/505216.